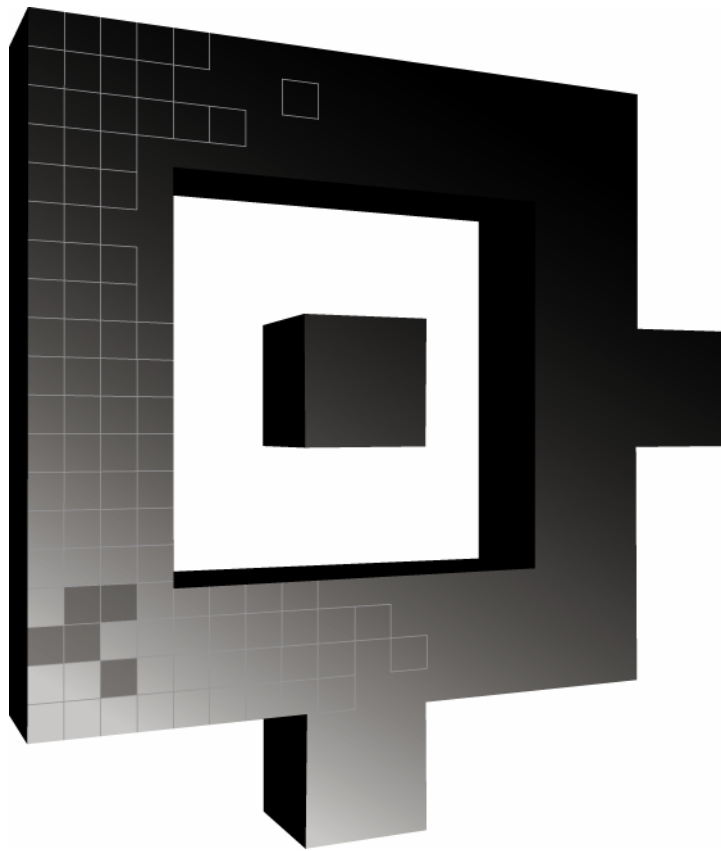


André Ourednik

La géographie cellulaire

**Esquisse d'une épistémologie géographique
des automates cellulaires**



Mémoire de Licence ès Lettres
Institut de Géographie
Université de Lausanne, 14 juillet 2005

Directeur:

Prof. François Bavaud, Section de l'Informatique et des Méthodes Mathématiques, Faculté des Lettres; Institut de Géographie, Faculté des Géosciences et de l'Environnement; Université de Lausanne.

Expert:

Prof. Henri Volken, Institut de Mathématiques Appliquées, Faculté des Sciences Sociales et Politiques; Université de Lausanne.

Illustration Couverture: *Humanone* © François Chessex, 2005

Table des Matières

INTRODUCTION.....	6
I. LES FONDEMENTS HISTORIQUES ET THÉORIQUES DU MODÈLE	11
1 LES AUTOMATES CELLULAIRES, UN MODÈLE	12
2 L'APPARITION DU PARADIGME CELLULAIRE	12
3 LE PROCESSUS DE LA FORME ET LA FORME DU PROCESSUS – LES FONDEMENTS D'UN MODÈLE DYNAMIQUE	13
4 LA NOTION DE COMPLEXITÉ	16
4.1 <i>La complexité structurelle</i>	17
4.2 <i>La complexité dynamique</i>	19
5 ÉMERGENCE, AUTO-ORGANISATION, AUTO-REPRODUCTION ET AUTOPOÏÈSE.....	22
5.1 <i>L'émergence</i>	22
5.2 <i>Les autophénomènes</i>	26
5.2.1 L'auto-organisation	27
5.2.2 L'autopoïèse	29
5.2.3 L'autoreproduction	31
II. UNE DÉFINITION GÉOGRAPHIQUE ET FORMELLE DES AUTOMATES CELLULAIRES.....	35
6 LES ÉLÉMENTS CONSTITUANTS.....	36
6.1 <i>Les lieux</i>	37
6.2 <i>Les états</i>	38
6.3 <i>De la fonction de transition à l'espace cellulaire</i>	40
6.4 <i>Les agents, un élément supplémentaire?</i>	48
7 UNE TYPOLOGIE SPATIALE DES AUTOMATES CELLULAIRES	53
7.1 <i>Les espaces unidimensionnels</i>	53
7.2 <i>Les espaces bidimensionnels</i>	55
7.3 <i>Les espaces tri- et n-dimensionnels</i>	57
7.4 <i>Les espaces aux coordonnées non-cartésiennes</i>	59
7.5 <i>Polygones, tores et sphères: l'incidence du voisinage des lieux limitrophes sur la forme de l'espace</i>	61
III. LIEUX, ÉTATS ET FONCTIONS DE TRANSITION COMME ABSTRACTIONS GÉOGRAPHIQUES DE LA RÉALITÉ	65
8 LE LIEU ET SON ÉTAT COMME RÉSULTAT DE LA TOPOMORPHOSE.....	66
9 LE VOISINAGE COMME PROBLÈME CENTRAL DE L'ÉLABORATION D'UN AC.....	69
9.1 <i>Qui est le voisin de X ?</i>	69
9.2 <i>D'où agissent les contraintes structurelles?</i>	70
9.3 <i>Le voisinage cellulaire dans la représentation graphique</i>	73
10 DES FONCTIONS APRIORIQUES VERS DES FONCTIONS EXTRAPOLÉES.....	77
10.1 <i>Entraînement des réseaux neuromimétiques</i>	78
10.2 <i>Évolution par algorithmes génétiques</i>	80
10.3 <i>La fonction de transition et l'équifinalité</i>	82
IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES ÉPISTÉMOLOGIQUES D'UNE GÉOGRAPHIE DES AUTOMATES CELLULAIRES	83
11 ENTRE ATOMISME ET HOLISME: LES AUTOMATES CELLULAIRES ET L'INTER- DÉTERMINATION DES PHÉNOMÈNES DE LA GÉOGRAPHIE HUMAINE.....	84
12 LES AUTOMATES CELLULAIRES ET LE « COMPRENDRE » EN GÉOGRAPHIE	86
13 L'EMPIRIE DE LA RAISON COMME RENAISSANCE D'UNE GÉOGRAPHIE EXPLORATIVE.....	88
14 LES AUTOMATES CELLULAIRES, LA GÉOGRAPHIE HUMAINE ET L'ESPACE COMME MÉTAPHORE	91
15 EN GUISE DE CONCLUSION: LES ALÉAS D'UNE MÉTHODE.....	92

16	ÉPILOGUE: VERS UNE SÉMIOLOGIE DYNAMIQUE.....	95
BIBLIOGRAPHIE, ANNEXES ET INDEX.....		97
	BIBLIOGRAPHIE	98
	ANNEXES.....	102
	<i>Logiciels recommandés pour l'exploration des automates cellulaires</i>	102
	<i>Résumé des Notations</i>	102
	Notations générales.....	102
	Notations particulières à ce mémoire	103
	INDEX	105

Introduction

Il y a de cela presque un siècle, Kasimir MALEVITCH suspendait son carré noir¹ dans un coin de salle lors de l'exposition « 0.10 » pour affirmer la nouvelle suprématie – celle de la sensation pure à la rencontre de la forme géométrique – qui redéfinissait le rapport de l'humain au phénomène esthétique. Les contours d'une pensée étaient tracés mais on se tourna rapidement vers des considérations plus « pratiques ». En 1920 vit jour le « Monument à la 3^e Internationale » de TATLIN. En 1936 naissait la « Charte d'Athènes », qui détermina les quatre fonctions de la ville-machine: « habiter, travailler, se divertir et circuler »². Voilà, en très bref, le chemin emprunté par la pensée constructiviste dans la première moitié du vingtième siècle.

On a vu depuis se construire les effrayants « shopping-malls »³, les HLM et leur violence désespérée, l'orthogonalité dépersonnalisante des demeures stalinistes. La projection au sol des concepts abstraits se solda par un échec massif, par une impasse historique dont la réalité sociale des villes post-modernes porte encore aujourd'hui les balafres.

Peut-on en donner la faute aux concepts eux-mêmes? Nous ne le pensons pas. Il nous paraît difficile d'argumenter que l'articulation des formes géométriques à la ville la rende nécessairement inhumaine et hideuse. Car dans l'espace euclidien, le carré n'est qu'un polygone régulier, la ligne n'est que la distance minimale séparant deux points. Rien du carré ne le détermine en tant que « forme parfaite », rien de la ligne ne la désigne comme l'idéal d'un itinéraire humain entre un domicile et un lieu de travail. La responsabilité de l'articulation de ces formes à l'espace humain ne revient de toute évidence pas à elles-mêmes mais à celui qui y procède. Et cette responsabilité est des plus lourdes.

La part prise de la géographie à cette responsabilité est considérable, hier comme aujourd'hui. Elle est la science fondamentale par excellence de « l'habiter » humain. C'est à elle, avant toute autre science, de formuler la ligne ou le carré en tant que projet aménagiste, de juger ce que ces formes signifient pour cet « habiter ». C'est à elle de formuler les formes urbaines et de les transmettre aux techniciens et preneurs de décisions qui façonneront concrètement le visage de la ville. Si elle ne parvient pas à se faire entendre, ou pire, si elle manque de *penser*⁴ cette forme, en la donnant, la ville en portera des séquelles.

Aujourd'hui, l'attention de la géographie est certes orientée vers de nouvelles formes. Nos sciences sociales héritent des objets mathématiques et géométriques issus d'un siècle d'études de processus dynamiques, du chaos, de la complexité, de fonctions récursives, adaptatives, hautement sensibles aux conditions initiales et, à moins d'être simulées, imprévisibles dans leurs résultats à long terme. Parmi ces nouveaux objets, une découverte majeure: les **automates cellulaires** (AC), systèmes dynamiques complexes composés de trois classes – les cellules, leurs états, et leurs fonctions de transition.

Dans ce nouvel environnement cellulaire, auquel nous consacrons le présent mémoire, la question et l'exigence d'une épistémologie rattachée à cette méthode reste

¹ MALEVICH Kasimir, 1913, « Carré noir sur fond blanc », huile sur toile, 106.2 x 106.2 cm. Ermitage, St. Petersbourg. Exposé pour la première fois en décembre 1915 à l'occasion de l'exposition « 0.10 ».

² LE CORBUSIER [1936], §77.

³ cf. OUREDNIK [2004].

⁴ cf. HEIDEGGER [1954].

néanmoins la même. Nous devons définir ce qui dans le phénomène géographique peut être pensé comme un état, ce qui peut l'être en termes d'une cellule individuelle, ou d'une dynamique de transition. Nous devons nous interroger comment l'objet géographique peut être pensé en ces termes et ce que signifie de le penser ainsi. Nous devons également comprendre ce que signifient les concepts globaux, rattachés aux AC, lorsqu'ils sont appliqués en géographie humaine – nous devons comprendre ce qu'est, du point de vue de notre discipline, l'« émergence », la « complexité », la « dynamique » et d'autres notions encore.

Ce que nous pouvons constater d'emblée est que les AC accordent une place unique à l'acteur individuel; unique particulièrement si l'on compare cette place à l'oubli qu'avait certes subi ce même individu au sein des formes globales imaginées par les utopies humanistes de la première moitié du vingtième siècle. L'individu, en effet, est aujourd'hui placé à la « base » même du modèle cellulaire.⁵

Ce retournement nous appelle cependant à nous interroger comment accorder cette place à l'individu sans lui ôter sa nature de participant d'une structure commune et globale – participation dont son existence même dépend. Il nous faut aujourd'hui, en clair, comprendre comment, tout en partant des individus jadis oubliés, il est possible de concevoir une telle structure. Ici, la notion d'*émergence* nous sera par exemple d'une importance capitale.

Le nouveau contexte géométrique et mathématique nous impose également une question majeure, ne s'éveillant que peu à peu des tacites présuppositions euclidiennes dans lesquelles une partie de la géographie reste encore aujourd'hui plongée. L'existence d'une géométrie riemannienne de manière distante, le caractère purement mathématique – donc au fond aspatial – de tout modèle informatique de manière immédiate, nous forcent à nous interroger sur la nature de l'espace lui-même. Car que révèle le modèle cellulaire de l'espace? Et cette révélation, quel rapport entretient-elle avec l'espace de la géographie humaine?

Il semble peut-être étonnant que ces questions interviennent maintenant. La découverte des AC remonte certes loin dans le passé, aux travaux accomplis par Stanislaw ULAM (1906-1984) et John VON NEUMANN (1903-1957). Mais d'ici que les découvertes traversent les barrières entre domaines scientifiques, les décennies s'écoulent. L'application de tout modèle ne peut d'ailleurs se passer d'un médium de diffusion populaire, c'est-à-dire, d'un instrument d'application et de représentation accessible et répandu. Les premiers modèles cellulaires devaient être exécutés à la main, à l'aide d'un jeu de go ou de pièces de monnaie sur une nappe quadrillée. Cela n'empêcha pas quelques chercheurs brillants comme T. C. SCHELLING (1921-) d'appliquer des modèles cellulaires dans le champ de la recherche en géographie humaine; une exploration conséquente du domaine dut néanmoins attendre l'essor des computers dont les écrans alimentés d'images générées par des processeurs rapides permirent à la potentielle « expressivité représentationnelle »⁶ des systèmes complexes de devenir effective aux yeux d'un grand public de chercheurs.

Aujourd'hui, la diffusion populaire datera néanmoins bientôt de deux décennies. Les possibilités de recherche sont à présent innombrables et le champ qu'elles recouvrent

⁵ Les AC font partie de ce que l'on appelle « modèles basés individu ».

⁶ « representational expressiveness »: O'SULLIVAN [2004], 288. cf. « expressive power of a formalism »: ZEIGLER [1990], 51.

des plus vastes. D'autant plus vastes qu'à la rapidité des processeurs s'ajoute une banque de données de type cellulaire sans cesse grandissante. Nous avons à l'esprit surtout les Systèmes d'Information Géographique⁷, ces puits richissimes d'information géoréférencée et informatisée, organisée de plus en plus souvent en matrices orthogonales régulières qui, articulées à l'aide d'un software performant, semblent tout prêts à l'implémentation de modèles dynamiques cellulaires.

Nous voyons que la question épistémologique tombe à pic car il s'en faut de peu qu'elle ne soit irrémédiablement devancée par l'usage. Elle est d'autant plus actuelle et pressante qu'à force de vouloir se rendre immédiatement « utile », le modèle cellulaire pourrait facilement s'ériger en évidence objective. Et là est justement le grand péril de tout modèle. Car il faut éviter à ce que la recherche en géographie humaine ne régresse vers un réalisme moniste particulièrement réducteur qui, dans toute la « naïveté de l'évidence apriorique »⁸, considérerait ce qui ne se veut qu'un modèle du phénomène géographique comme un phénomène en-soi, doté d'une valeur de vérité indépendante du regard porté.

Le péril est ici bien réel car c'est précisément dans ce type de certitudes que puisent leur légitimation certains procédés aménagistes arrogants aux conséquences déplorables, voir franchement tragiques.

D'autre part, au niveau même de l'épistémologie, une impasse menace car, à défaut d'être suffisamment pensé, le modèle cellulaire ne peut s'attendre qu'à un rejet virulent de la part des sciences auxquelles il se propose – un rejet qui, malheureusement, s'est déjà fait entendre de part et d'autre.

Comment éviter donc que l'horizon du possible ouvert par les AC à la géographie humaine ne se referme sur un déplorable échec? Tout d'abord, pensons-nous, en tenant compte du fait qu'en *consort* aux découvertes mathématiques spectaculaires, le vingtième siècle avait également assisté à l'essor prodigieux en recherche phénoménologique, psychologique, herméneutique et linguistique⁹. De cette recherche, dont il ne s'agira pas ici de faire l'exégèse, nous retiendrons surtout trois découvertes, que nous tâcherons de respecter tout au long de notre exposé:

1. Tout objet est objet *pour* un sujet.
2. La relation du sujet à l'objet est une relation intentionnelle. Elle relève en cela d'un phénomène de *sens*.
3. L'*objectivité* scientifique est dite objective car elle se rapporte au résultat constamment réacquis de l'objectivation par un groupe de penseurs se reconnaissant comme représentants d'une même discipline. Le porteur concret de cette objectivation commune est un système de représentation symbolique.

C'est seulement armés de ces considérations, qu'il nous semble possible de puiser dans les nouvelles théories mathématiques afin d'esquisser les contours d'une épistémologie de l'usage des AC en géographie humaine. Une telle épistémologie lui permettra alors non seulement de tirer profit des technologies de computation nouvelles sans en devenir soi-même une mais également de préciser la nature de son propre objet.

⁷ cf. BENENSON, TORRENS [2004].

⁸ « naïvität apriorischer Evidenz »: HUSSERL [1935], §9b.

⁹ cf. BERQUE [1995], 34.

Concrètement, pour y parvenir, il nous sera nécessaire d'atteindre trois objectifs centraux.

Premièrement, comme évoqué, nous devons relever comment les notions liées aux AC s'articulent à notre discipline. Nous devons non seulement mettre en avant l'adéquation de ces notions à la discipline géographique, là où ces adéquations existent déjà, mais également mesurer l'apport théorique nouveau suscité par le point de vue des que les AC offrent sur les objets géographiques.

Deuxièmement, nous devons proposer une description formelle des AC qui puisse, elle aussi, s'articuler à la manière dont la géographie, en tant que science humaine, conçoit ses phénomènes.

Troisièmement, enfin, nous devons expliciter le rôle du concepteur-observateur du modèle cellulaire. Il nous sera, à cette fin et à maintes reprises, nécessaire d'examiner le personnage du géographe-modélisateur lui-même.

Comme lien entre ces trois buts, la plus forte hypothèse, ou pour mieux s'exprimer, le plus fort espoir qui anime le présent mémoire est de concevoir une possibilité de rapprocher la méthode dynamique des AC d'une géographie phénoménologique et existentialiste, capable d'une véritable réflexion sur l'humain, au sein de son écoumène¹⁰.

Le défi ainsi posé nous semble relevable. D'une part grâce à la générosité de nombreux chercheurs qui rendent leurs environnements informatiques cellulaires accessibles au travers du réseau internet. Ceux-ci nous permettent en tout moment de faire une expérience directe, et déclinée en une multitude de formes, des modèles abstraits dont il sera question dans notre travail. D'autre part, parce qu'un certain nombre de travaux philosophiques se sont récemment penchés sur la question.

Nous relevons, enfin, le défi dans la confiance en la géographie elle-même. Parce que la nature de la géographie veut que l'humain soit considéré dans sa composante à la fois intentionnelle et physico-spatiale, nous pensons que c'est en elle, avant tout autre science, que peuvent se rencontrer la philosophie, les mathématiques et les sciences sociales. En tant que science d'une telle rencontre, elle nous semble un terrain de prédilection pour le développement d'une véritable *pensée* des automates cellulaires.

¹⁰ cf. BERQUE [1995].

I. Les fondements historiques et théoriques du modèle

Dans ce premier chapitre, nous présentons le contexte historique, philosophique et mathématique dans lequel s'inscrivent les automates cellulaires et leur utilisation pour la modélisation de phénomènes de géographie humaine. De nombreuses notions indispensables pour la suite de notre mémoire y sont définies. Une attention particulière est accordée à la notion centrale d'émergence et à ses notions associées.

1 Les automates cellulaires, un modèle

Un modèle – voici ce qu'est tout automate cellulaire lorsque évoqué dans le contexte de la géographie. Un **modèle** est une description délibérément schématique d'un phénomène. Parce que schématique, le modèle parvient à articuler les aspects d'un phénomène en une unité de sens, ce à quoi il parvient entre autres en relevant des similitudes entre ce qui semble distinct; par l'intermédiaire du modèle, des analogies ou des relations difficiles à saisir dans l'immédiateté de la perception du phénomène viennent à paraître.

Un modèle n'est cependant pas une réflexion à part du phénomène géographique. Il ne *reflète* pas ce phénomène, il y *participe*; et cela même de deux manières différentes.

Premièrement, c'est toujours par rapport à un modèle que le géographe formule ses prédictions et ses actes, qui pourtant ont le phénomène géographique dans son ensemble pour référent et champ d'expression. De ce point de vue, nous pouvons dire que le modèle géographique façonne son phénomène. Cependant, que la réalité dans laquelle ce phénomène s'inscrit s'étend au-delà de l'horizon de la conscience et du modèle du géographe est une présupposition nécessaire – elle seule permet au géographe de comprendre l'échec de certaines de ses prévisions et interventions. L'irréductibilité de la **réalité** au modèle, qui s'exprime dans cet échec, renvoie à ce que FREUD appelle le « principe de réalité »¹ dans le contexte du psychique. Ce principe façonne le modèle géographique au même titre que la démarche consciente du géographe. Le modèle, ainsi, surgit du dévoilement progressif de la réalité – dévoilement qui n'est autre que la constitution dans le temps du rapport entre le géographe et son monde, ainsi que, d'une manière pas si différente, du rapport entre la *géographie* et son monde.

Le modèle est cependant toujours *dans* cette réalité, *dans* ce monde. Pour le géographe et la géographie, le monde ne donne géographiquement sens qu'*en tant que* modèle; il ne donne sens que parce qu'il est *aussi* modèle. Ce n'est, autrement dit, que ce qui est modèle dans la réalité qui donne sens. Et c'est ainsi, en tant que sa structure sémantique, que le modèle participe d'une deuxième manière au phénomène géographique; en l'élaborant, son créateur participe à l'existence du phénomène lui-même – il élabore un sens particulier, géographique, de la réalité.

Découvrir quel est le sens que le modèle cellulaire relève de la réalité géographique, éclairer son comment formel et montrer de quelles orientations philosophiques et scientifiques il procède est le rôle de cette première partie de notre mémoire.

2 L'apparition du paradigme cellulaire

L'histoire des automates cellulaires peut être retracée aux laboratoires de Los Alamos des années 1940'. Le mathématicien Stanislaw ULAM² s'y intéressait alors à l'évolution d'objets géométriques définis de façon récursive. La trame de ses recherches était un espace infini à deux dimensions, divisé en cellules identiques pouvant adopter deux états différents: actif et passif. Le devenir de chaque cellule était dicté par l'état des cellules avoisinantes. C'est déjà en faisant évoluer son système sur les ordinateurs de

¹ cf. FREUD [1915].

² <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Ulam.html>

l'époque qu'ULAM eût rapidement constaté que son mécanisme permettait de générer des figures complexes qui, dans certains cas, pouvaient se reproduire.

Ce fut une heureuse corrélation qu'au même lieu et à la même époque, John VON NEUMANN – inspiré des travaux de TURING – travaillait à la conception du ce qu'il nommait un « kinématon », une machine autoreproductrice. Le kinématon devait être capable, à partir de matériaux trouvés dans l'environnement, de produire n'importe quelle machine décrite dans son programme, y compris une copie de lui-même. La construction du kinématon au sein de l'univers réel présentait néanmoins des obstacles techniques insurmontables pour l'époque. C'est alors qu'ULAM eût suggéré à VON NEUMANN de s'affranchir des conditions physiques réelles en construisant le kinématon au sein de l'espace cellulaire de son modèle. Sur cette base, VON NEUMANN conçut un automate cellulaire de quelques 200'000 cellules à 29 états capable d'autoreproduction non-triviale. Conceptuellement, son résultat équivalait au but recherché: une machine faite d'éléments d'un AC qui s'auto-reproduit au sein d'un AC équivaut à une machine faite d'éléments de l'univers physique qui s'auto-reproduit au sein de l'univers physique. VON NEUMANN parvint ainsi à produire un modèle algorithmique des dynamiques engendrant des phénomènes complexes du vivant. Du à la capacité de calcul réduites des computers de l'époques, il ne put néanmoins pas procéder à une **simulation** du modèle, c'est-à-dire, à son déploiement concret dans l'espace et le temps du computer.

En 1966 et 1968, BURKS puis CODD publièrent les premiers ouvrages dédiés aux AC³. Deux ans plus tard paraissait un article de GARDNER consacré à un automate cellulaire particulier intitulé « Jeu de la Vie de John CONWAY »⁴. Dans cet AC, certains patterns apparaissaient et subsistaient d'eux-mêmes à partir de conditions initiales aléatoires et de règles dynamiques précises. À la *dynamique* et à la *complexité* vint alors s'ajouter la notion d'*émergence* de formes.

C'est ainsi que trois notions clés de la pensée moderne furent incarnées par un modèle mathématique. Voyons à présent comment ces notions articulent les AC à la géographie humaine.

3 Le processus de la forme et la forme du processus – les fondements d'un modèle dynamique

Un épisode majeur de l'intérêt que la géographie humaine porte à ses processus peut certainement être situé à la publication par HÄGERSTRAND [1952, 1953] de son célèbre modèle de diffusion de l'innovation. Une vingtaine d'années plus tard⁵ le même auteur publia également les premières représentations spatiotemporelles des activités humaines.

La généralisation de cet intérêt dut néanmoins attendre un changement d'orientation de la discipline s'étant opéré vers fin des années 1980', lorsque l'on s'était détourné de la recherche d'invariants structurels du structuralisme pour s'adonner à l'examen

³ NEUMANN von [1966], publié par BURKS; CODD [1968].

⁴ GARDNER [1970].

⁵ HÄGERSTRAND [1975].

d'invariants « au niveau de la fonctionnalité, dans les limites et les conditions d'évolution de la structure »⁶.

En quoi ces deux approches – appelons-les structurelle et dynamique – divergent-elles et quelle implication cette divergence a-t-elle pour l'utilisation des AC en géographie? Pour bien le comprendre, il est peut être bon de remonter vers les origines de leur distinction. En effet, du point de vue de l'histoire de la pensée, celle-ci remonte probablement aussi loin dans le passé que le débat entre les éléates et les philosophes du flux universel – c'est-à-dire, aussi loin que l'opposition du « τὸ ἐὼν ἔστι »⁷ au « πάντα ῥεῖ »⁸. L'axe de ce débat est articulé par rapport à la question ontologique de l'Être, que la première de ces écoles conçoit comme *présence*, alors que l'autre le comprend en tant que *Devenir*. Pour trois raisons, au moins, le formalisme des AC semble se placer dans l'héritage de la deuxième école.

D'une part, dans un monde du Devenir, toute forme devient – elle existe en tant que *transfiguration* de soi-même où, si l'on veut, comme transfiguration d'une forme précédente. Dans l'approche dynamique cellulaire, de même, les formes sont considérées dans leur Devenir, dans leur changement. L'attention de la recherche en AC part de la présupposition de ce changement permanent pour s'attacher aux raisons de la persistance de certaines formes ou systèmes. Comme dans la philosophie du Devenir, la question de l'*identité* des formes dans leur chute dans le temps est au centre des problèmes suscités par le modèle cellulaire.

D'autre part, la conception du monde en tant que Devenir permet de parler de l'avant et de l'après de tout phénomène et s'ouvre ainsi sur des schémas d'explication causaux. Ce n'est pas par hasard que l'apparition du *causalisme* se fait dans la pensée de LEUCIPPE, figure majeure parmi les philosophes du Devenir. Le modèle cellulaire, à son tour, appelle à une description des formes en termes de leur histoire, des *causes* ayant mené à leur apparition ou, comme nous le verrons plus loin, des conditions de leur émergence (5.1).

Dernièrement, le Devenir induit le Multiple là où l'Être ne permet que l'Un. C'est donc à nouveau sans surprise que nous trouvons les fondements de l'*atomisme* dans la pensée de LEUCIPPE et de son élève DÉMOCRITE. Et cela rapproche encore une fois les AC de l'école du Devenir – car tout AC est un modèle basé individu⁹, composé d'éléments distincts et insécables.

Que retirer de ce retour en arrière? La géographie, évidemment, n'a pas l'Être du monde pour objet d'étude, elle n'est pas une ontologie – du moins pas une ontologie générale. Toutefois, sa façon de se consacrer à ses phénomènes ne se situe pas – et ne peut se situer – en dehors d'une position ontologique à leur égard, en dehors d'une conception fondamentale de la nature de leur apparition. Il serait illusoire, en tentant de comprendre un phénomène, de se considérer en dehors du choix entre sa formulation en termes de ce qu'il *est* ou de ce qu'il *devient*, ou – pour mieux l'exprimer – en termes de *ce* qu'il est ou du *comment* il est. Une épistémologie géographique se

⁶ PUMAIN, SANDERS, SAINT-JULIEN [1989], 12.

⁷ « ce qu'il y a, il y a », rendu abrégé par la tradition de « ἡ μὲν ὅπως ἔστιν τε καὶ ὡς οὐκ ἔστι μὴ εἶναι »: « qu'il y a et que le non-être il n'y a pas »: PARMÉNIDE [515-440 av. J.C.] *Le poème*, §2.3: fragment tiré de PROCLUS, *In Timaeum*. Dans cette expression s'affirme la pensée que seule la présence immuable relève de l'Être; ce qui

⁸ « est » dans le sens d'une activité, ne relève « que » de l'Êtant, ou pire, d'une simple illusion.

⁹ « tout s'écoule »: HÉRACLITE [~520-460 av. J.C.], §13: fragment tiré de SIMPLICIUS, *Commentaire de la Physique [d'Aristote]*.

⁹ « In-dividuum » correspond à « ἄ-τομος ».

considérant en dehors de la question de l'Être ne serait qu'un banal manuel d'utilisateur.

Ainsi, la question de l'Être est la première à pouvoir nous faire entrevoir à quel point la divergence entre la représentation dynamique et structurelle d'un phénomène est loin d'être nette. Cela est déjà visible dans une expression d'HÉRACLITE comme « dans les mêmes fleuves, nous descendons et nous ne descendons pas, nous sommes et nous ne sommes pas »¹⁰. Une ontologie plus récente nous avertit de même clairement qu'une conception dynamique du monde peut tout à fait relever d'un « figement du Devenir dans la présence »¹¹, que l'image d'une dynamique – pour autant que l'on en présuppose une en particulier – ne relève pas moins d'une vision statique du monde que le concept d'une présence immuable. En cela, c'est particulièrement le causalisme qui, traçant la séquence des états d'un système dans l'espace-temps, donne une structure statique à son existence. Nous reviendrons à cette réflexion dans le chapitre 7.1, lorsque nous présenterons les formes de processus des automates uni- et bidimensionnels de WOLFRAM.

En ce qui concerne l'Un et le Multiple, les longues discussions de l'antiquité autour de la cosmologie d'EMPÉDOCLE de même que, dans une pensée plus récente, le caractère à la fois pluriel et unique de la Volonté de Puissance chez NIETZSCHE suffisent, de même, à révéler la fondamentale indiscernabilité des deux positions.

C'est sur fond de la conscience de cette indiscernabilité que nous aborderons, dans le chapitre 11, la divergence entre atomisme et holisme. C'est sur le même fond, également, que nous considérerons la notion de « structure » – en géographie comme partout ailleurs – dans sa fondamentale ambivalence, c'est-à-dire, dans son caractère à la fois temporel et – « καὶ » – intemporel.

Laissons, cependant, ces questions pour les parties ultérieures de ce mémoire et considérons à présent comment les processus dynamiques acquièrent leur expression dans les formes et formules de la mathématique – champ de connaissance où est né le modèle cellulaire.

Un point d'origine peut probablement être trouvé dans les travaux de LEIBNIZ (1646-1716)¹² et de NEWTON (1642-1727)¹³ qui parvinrent, de manière quasiment simultanée, à modéliser les processus dynamiques par le *calcul infinitésimal*. Ce dernier permet dès lors à l'analyse mathématique de traiter des grandeurs infiniment petites et de résoudre ainsi de manière formelle le paradoxe de ZÉNON¹⁴. L'apparition du calcul infinitésimal ouvre la voie au modèle des *équations différentielles*¹⁵ de EULER (1707-1783) et ce sont déjà ces dernières qui permettent de rendre compte de développements non linéaires, reflétant de réelles interactions entre les acteurs d'un système et les cycles limites que ces interactions produisent. Les solutions qualitatives des équations différentielles complexes – sous forme de représentations graphiques comme les *champs de pente* ou les *espaces de phase* – sont employées depuis leur définition¹⁶ par POINCARÉ (1854-1912).

¹⁰ « Ποταμοῖς τοῖς αὐτοῖς ἐμβαίνομεν τε καὶ οὐκ ἐμβαίνομεν, εἶμέν τε καὶ οὐκ εἶμέν. »: HÉRACLITE *Questions Homériques*, §24 (Diels §49a).

¹¹ « Beständigkeit des Werdens in der Anwesenheit »: HEIDEGGER [1934].

¹² LEIBNIZ [1849], cité par WEHR [2002]. La première publication remonte à celle citée par EDWARDS [1937]: « Nova Methodus pro Maximis et Minimis, itemque Tangentibus... » in: *Acta Eruditorum*, 1684.

¹³ Voir, p. ex., EDWARDS [1937] ou WEHR [2002].

¹⁴ Zénon, lui aussi, compte parmi les Éléates.

¹⁵ EULER [1755], cité par EDWARDS [1937], pp. 269-300.

¹⁶ Celle-ci peut être approximativement datée à 1881. Voir CHENCINER [2001], pp. 2-4.

Un modèle plus récent des processus dynamiques est incarné par les *mathématiques récursives*¹⁷, développées entre autres par CHURCH (1903-1995). C'est principalement sur ces dernières que repose la *théorie algorithmique de l'information*¹⁸, indispensable à la réalisation de programmes informatiques en général. Ces modèles s'inscrivent, de plus est, dans le courant constructiviste¹⁹ de la pensée mathématique qui, à son tour, constitue l'une des bases conceptuelles des langages orientés objet²⁰, indispensables à la simulation des AC.

Les *automates cellulaires*, l'un des plus récents parmi les modèles dynamiques, se distinguent des mathématiques récursives en cela qu'ils simulent l'interaction simultanée d'un nombre indéfini d'agents ou de paramètres, permettant ainsi de modéliser certains processus spatiaux particulièrement difficiles à représenter en termes d'un système d'équations différentielles. Comme revers de cet avantage, leur permettant de respecter un grand nombre de contraintes propres aux objets complexes des sciences humaines, les AC ont pour défaut de ne pouvoir fournir aucune solution analytique décrivant la dynamique étudiée. Alors qu'un grand nombre d'équations récursives peut être retranscrit en termes d'une équation différentielle, une telle conversion est presque toujours impossible dans le cas des AC. Il est en cela possible de les considérer comme les « plus dynamiques » des modèles dynamiques, leur solution étant toujours de l'ordre de la simulation dans le temps.

4 La notion de complexité

L'impossibilité de fournir une solution analytique à l'évolution d'une variable dépendant de la dynamique d'un AC tient à la nature complexe de ce modèle. En effet, le paradigme des AC s'inscrit dans le contexte mathématique et philosophique des *systèmes complexes*, des *systèmes non-linéaires* et de la *théorie des systèmes*, rattachés tous à la *théorie de la complexité*, elle-même une déclinaison américaine du *constructivisme pragmatique*²¹.

Mais qu'est-ce que la complexité? Car mis à part ce rattachement englobant à un ensemble structuré de paradigmes, la notion est diffuse – elle montre de nombreuses significations distinctes, variant avec le contexte de son évocation.

¹⁷ CHURCH [1936]. Une fonction récursive contient soi-même dans sa définition, ce qui fait qu'elle peut se perdre dans une récursion infinie et ne donner donc aucun résultat. Pour donner un exemple particulier – seulement indirectement lié à la récursivité définie par CHURCH – la fonction $f(x) = (1 \text{ si } x = 0; x \cdot f(x-1) \text{ sinon})$ donne pour tout $x \geq 0$ la factorielle $x!$. La fonction récursive $g(x) = g(x) + 1$ ne produit, de son côté, aucun résultat.

La **thèse de CHURCH** énonce que toute fonction « calculable » est une fonction pouvant être définie de manière récursive et donnant un résultat. Cette thèse est reconnue comme équivalente à celle de TURING, définissant une fonction comme calculable si elle peut être résolue par une *machine de TURING*, c'est-à-dire, par un computer. Voir, p. ex. WOLFRAM [2002], 1125.

¹⁸ SOLOMONOFF [1964], KOLMOGOROV [1965], CHAITIN [1966].

¹⁹ Le courant constructiviste en mathématiques maintient, p. ex., que pour prouver que $\forall x \in X (B(x))$, il est nécessaire de construire un algorithme qui, à partir de n'importe quelle entrée $z \in X$ produit une preuve de $B(z)$. Voir, p. ex.: http://en.wikipedia.org/wiki/Constructivism_%28mathematics%29

²⁰ Type de langages opposé aux langages dits procéduraux ou séquentiels comme Basic, Pascal ou C. Les langages orientés objet travaillent avec des classes dont des objets particuliers peuvent être instanciés par certaines procédures. Le premier des langages orientés objet fut « Simula-67 », développé par DAHL et NYGAARD en 1967. Des exemples plus récents sont C++ ou Java.

²¹ Dans le champ d'influence russe, le courant de pensée analogue à la *théorie de la complexité* porte le nom de *théorie numérique des algorithmes*.

En ce qui nous concerne, nous voulons nous restreindre à examiner ce que signifie cette notion dans le contexte particulier de la géographie humaine. Le « Dictionnaire de la Géographie et de l'Espace des Sociétés »²² nous permet d'entrer dans la matière de cette question en proposant, sous l'article « Complexité », la double définition suivante:

« A. Caractéristique d'un système qui, en raison de l'hétérogénéité des processus qui s'y déroulent, possède la capacité d'évoluer dans différentes directions, ce qui rend cette dynamique difficile à prévoir à partir des conditions du présent. »

« B. Par extension, paradigme scientifique qui s'oppose au paradigme analytique et privilégie les relations entre éléments, les causalités non linéaires et le changement global des réalités étudiées. »²³

Nous avons donc d'une part la complexité comme dynamique, d'autre part la complexité comme approche, l'une étant liée à l'autre par le fait que le géographe adoptant le paradigme scientifique B cherchera à comprendre un phénomène en termes d'une structure dynamique tombant sous la description A. Mais quels sont les contextes mathématiques – et philosophiques – auxquels cette complexité est liée et qui l'articulent au modèle cellulaire et en quoi s'exprime-t-elle de manière formelle?

Notons d'abord que cette complexité ne se présente pas uniquement sous un aspect dynamique, sur lequel est mis l'accent dans la définition précédente, mais sous un aspect ambivalent dynamique-statique que nous avons relevé, dans le chapitre précédent, comme étant propre à tout modèle. Ainsi, à part de devoir être considérée en tant que caractéristique de la dynamique d'un système, la complexité est à considérer dans son aspect structurel, c'est-à-dire, dans son aspect d'agencement complexe d'éléments. Consacrons nous d'abord à ce premier aspect.

4.1 La complexité structurelle

Le complexité statique – ou structurelle – peut dans un premier temps être approchée au travers de la *théorie de l'information*. Au sein de celle-ci, elle relève alors de l'irrégularité d'un agencement, au sein d'un espace discret donné, d'un nombre d'entités diverses, représentant chacune une valeur. Un tel agencement, donnant par exemple pour chaque unité discrète d'un territoire donné son occupation du sol, peut être conçu comme un agencement d'éléments syntaxiques. La complexité – l'irrégularité – de cet agencement peut alors être adéquatement quantifiée en termes de sa teneur en information.

Parmi les plus connues des mesures quantitatives de cette teneur, il existe d'abord la *complexité algorithmique*²⁴ qui mesure la longueur minimale, en bits, de l'algorithme nécessaire à reproduire ce même agencement. Cette notion est, néanmoins, que semi-calculable, dans le sens où l'on ne peut jamais prouver que l'on détient, pour objet de mesure, l'algorithme le plus court possible. Le géographe trouvera donc intéressant de se tourner vers une autre mesure de teneur en information, donnée par l'*entropie* de

²² LÉVY, LUSSAULT [2003].

²³ THIBAULT S., « Complexité » In: LÉVY, LUSSAULT [2003].

²⁴ Cette complexité, dont l'élaboration est due à SOLOMONOFF [1964], KOLMOGOROV [1965] et CHAITIN [1966] est souvent aussi appelée « complexité de KOLMOGOROV-CHAITIN ». Voir aussi LYRE H. [2002].

SHANNON²⁵. Celle-ci peut être obtenue en sommant le nombre de configurations syntaxiques possibles, c'est-à-dire, d'états possibles d'un système, tout en pondérant chacun de ces états par la probabilité de son occurrence. Formellement, elle est souvent exprimée comme:

$$-\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

Où $\{p_1, p_2, \dots, p_{n-1}, p_n\}$ donnent, justement la probabilité d'occurrence des états numérotés 1, 2, ..., n-1, n.

Originellement inventées pour mesurer la complexité d'un message – c'est à dire, d'un agencement d'éléments syntaxiques en *une* dimension – la complexité algorithmique ou l'entropie peuvent aisément être généralisées à deux, voir plusieurs dimensions²⁶.

La complexité structurelle, telle qu'elle est conçue par la théorie de l'information, se réfère toutefois implicitement à un espace prédéfini. C'est l'irrégularité de la répartition, au sein de cet espace, qui donne sa teneur en information, et, par la même occasion, sa complexité. Or, la structure d'un système géographique ne relève pas forcément d'une telle localisation de ses entités constituantes au sein d'un espace prédéterminé, mais également et surtout – ainsi que nous le verrons dans le chapitre 6.1 – d'un rapport relationnel entre ces diverses entités.

Cet autre aspect de la « structure géographique » nous demande de formuler une autre façon de mesurer sa complexité. Étant donné que c'est le nombre de relations qui, ici, nous intéresse, nous voulons définir un **indice de complexité relationnelle** – donnant la complexité d'une structure géographique constituée d'un ensemble de n entités en interaction mutuelle – comme représentant le rapport entre le *nombre de relations effectives* existantes entre ces entités et n^2 , le nombre maximal de relations pouvant potentiellement s'établir entre des paires de ces entités. Le nombre de relations effectives correspondra, pour nous, à la somme du nombre de « voisins » que possède chacune de ces entités. Formellement, l'indice de complexité relationnelle peut donc être exprimé comme:

$$\frac{\sum_{i=1}^{|X|} |\Psi(x_i)|}{|X|^2}$$

La présente définition – qui ne se veut, certes, qu'esquisse d'un tel indice à développer dans des travaux à orientation purement mathématique – fait usage des éléments d'un formalisme que nous n'aurons présenté que dans le chapitre 6. Nous ne voulons pas devancer cette présentation et invitons donc le lecteur de revenir par la suite, s'il le désire, à la présente formule.

Afin de poursuivre notre exposé de la notion de complexité, examinons à présent celle-ci du point de vue dynamique.

²⁵ SHANNON, WEAVER, [1963].

²⁶ Voir, p. ex., BAVAUD [2003a].

4.2 La complexité dynamique

La complexité dynamique ne s'exprime pas dans l'état synchronique d'un système mais dans sa diachronicité, c'est-à-dire, dans l'enchaînement de tels états au cours d'une évolution temporelle. Elle peut être observée dans l'évolution d'une variable ou d'un ensemble de variables représentant cet état.

La complexité dynamique la plus célèbre est certainement la *complexité déterministe*²⁷, rattachée à la *théorie du chaos*. Cette théorie – que l'on pourrait, plus précisément, désigner comme théorie d'hypersensibilité aux conditions initiales – dévoile la nature imprédictible du développement de certains systèmes dynamiques déterministes. Cette imprédictibilité – dont il était question dans la définition géographique donnée plus haut – résulte du fait que, afin de pouvoir prévoir le développement d'un phénomène chaotique, ses paramètres initiaux devraient être connus avec une précision infinie. Car dans un tel système, le plus infime changement de paramètre intervenant dans le processus prend de l'ampleur avec le temps et conduit le système vers un état radicalement divergent: un effet que l'on appelle souvent « effet papillon », pour suggérer qu'un battement d'aile du dit lépidoptère pourrait, théoriquement et à la longue, être à l'origine d'un ouragan²⁸.

Le plus ancien exemple d'un système dynamique complexe remonte probablement au système gravitaire à trois corps, examiné par POINCARÉ dans un article de 1892²⁹. Les équations différentielles (cf. 3), qui permettent de calculer pour ce système dynamique la position de tous les corps en un temps précis donnent, en effet, déjà des résultats radicalement divergents pour des vitesses ou des masses ne serait-ce que légèrement altérées dans la situation initiale.

Un autre modèle de système complexe ayant fait date dans l'histoire de la théorie du chaos est le modèle que Edward N. LORENZ (1917-), proposa en 1963³⁰ pour un système météorologique. Ce modèle, constitué d'un système à trois équations différentielles, a conduit notamment à la formulation du concept de l'« effet papillon » de même qu'à celui de l'« attracteur étrange ».

Comme mesure de la complexité d'un système chaotique, la plus fréquemment utilisée est celle de l'exposant de LYAPUNOV – noté $\lambda(x_0)$ – qui donne la vitesse moyenne de la divergence entre les solutions d'une fonction en partant d'une valeur initiale légèrement différente, par un facteur ε , d'une valeur initiale x_0 quelconque. Si nous considérons, par exemple, l'équation aux différences non-linéaire $x_{n+1} = f(x_n)$, l'exposant de LYAPUNOV peut être formalisé par l'expression suivante³¹:

$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{n} \log \left| \frac{f^n(x_0 + \varepsilon) - f^n(x_0)}{\varepsilon} \right|$$

Si $\lambda(x_0)$ est positif, les évolutions du système modélisé par l'équation aux différences divergent pour des écarts infinitésimaux des valeurs initiales. Plus $\lambda(x_0)$ est grand, plus

²⁷ Plusieurs noms sont donnés à la *complexité déterministe*. Certains l'appellent simplement *chaos*, d'autres, comme DAUPHINÉ [2003], la désignent comme *complexité des systèmes non-linéaires*.

²⁸ Pour une approche critique de la théorie du chaos et de ses interprétations, voir WEHR [2003].

²⁹ POINCARÉ [1892], cité par WEHR [2003].

³⁰ LORENZ [1963], cité par WEHR [2003].

³¹ Version proposée par WEHR [2003], 73.

grande et la vitesse de la divergence et plus le système est chaotique, ou complexe, selon les points de vue.

Notons deux choses à l'égard de cet indice de complexité. D'abord, le lecteur doit savoir que la forme ci présentée de l'exposant de LYAPUNOV ne correspond pas à sa forme générale³². Dans le cas des AC, par exemple, une toute autre façon de mesurer cet exposant doit être imaginée³³.

Notons, d'autre part, que d'autres indices de complexité, spécifiques aux AC, ont également été proposés; comme celui des quatre classes de WOLFRAM³⁴ ou celui du paramètre de LANGTON³⁵. Dans le champ de leur application, ces indices plus récents permettent, par ailleurs, d'établir une distinction entre la complexité dynamique proprement dite et le chaos déterministe, plaçant la « complexité » à mi-chemin entre la régularité cyclique et le chaos. Les classes de WOLFRAM – dont seule la 4^e est dite, justement, complexe – ne peuvent cependant être déterminées « qu'à posteriori, c'est-à-dire, par simulation et observation du comportement »³⁶. Elles ne s'appliquent, d'autre part, qu'à une classe restreinte d'automates cellulaires. Un indice de complexité généralisé pour les AC reste à être formulé. Pour notre propos, nous pouvons donc provisoirement englober sous la notion de « dynamique complexe » toute forme temporelle dont la structure générale dépend à un haut degré de précision des relations inter-élémentaires qu'elle réalise dans le temps. La grande majorité des AC tombe sous cette définition simplifiée.

Avant de procéder, rappelons encore que les deux types de complexité, dynamique et statique, sont bien sûr liés; et cela non seulement pour les raisons évoquées dans le chapitre précédent. Ainsi d'abord, comme nous le verrons encore (7.1, 7.2), une succession dynamique d'états d'un système à n dimensions peut être considérée comme une structure syntaxique à $n+1$ dimensions. Une complexité syntaxique d'une telle structure – bien que dynamiquement gérée – peut être considérée et calculée.

D'autre part, dans le cas, par exemple, du modèle à trois corps de POINCARÉ, il est possible d'affirmer que sa complexité statique – exprimée en termes de la complexité des relations existant en tout moment entre les diverses quantités impliquées dans ce système – est à l'origine de sa dynamique complexe. Cette dernière émane, de ce point de vue, de l'*interaction* entre un nombre d'éléments distincts, formant un agrégat à une certaine échelle ou dans un certain espace³⁷.

La complexité statique, elle, ne peut à son tour s'exprimer que dans le temps – sans ses conséquences sur le développement d'un système, l'interaction entre des entités géographiques est dépourvue de contenu: rien ne lui donne teneur et l'on pourrait déclarer qu'elle n'existe pas.

Ces considérations auront d'importantes conséquences pour la relation entre la fonction de transition d'un AC et l'espace dans lequel celui-ci s'inscrit, d'un point de vue géographique – une relation que nous traiterons en profondeur dans les chapitres ultérieurs.

³² Une forme demandant une expertise avancée en mathématiques pour être saisie.

³³ Voir, pour une telle façon, WOLFRAM [2002], 905.

³⁴ WOLFRAM [2002], 231.

³⁵ LANGTON [1990].

³⁶ FATÈS [2001], 23.

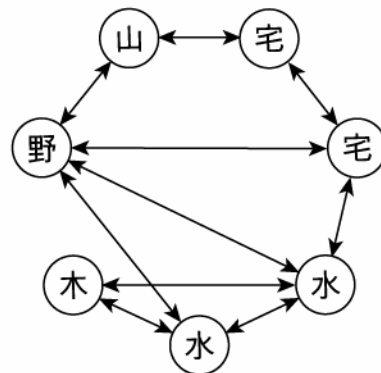
³⁷ O'SULLIVAN [2004] désigne d'ailleurs la complexité dynamique comme « *complexité d'agrégats* ».

Complexité structurelle

complexité syntaxique

野	野	山	山	山
水	野	宅	宅	山
水	水	宅	宅	野
木	水	水	水	水
木	木	野	木	木

complexité relationnelle



Complexité dynamique

exemple: chaos déterministe

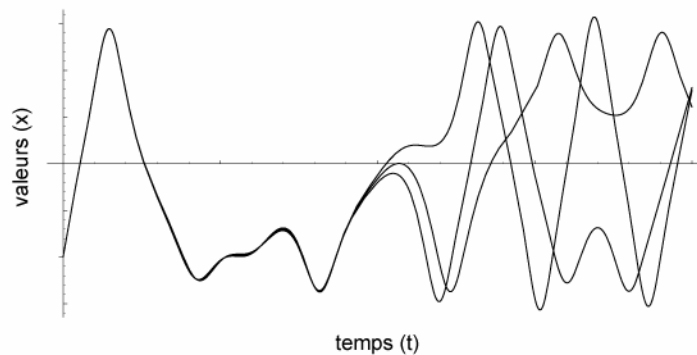


Figure 1: Complexité structurelle (statique) et complexité dynamique. Le graphique illustrant le chaos déterministe, généré avec MATHEMATICA, montre ici trois évolutions de x en fonction de t , données par l'équation différentielle de Duffing pour les trois paramètres initiaux $x'(0) = 1.000$, $x'(0) = 1.001$ et $x'(0) = 1.002$.

5 Émergence, auto-organisation, auto-reproduction et autopoïèse

5.1 L'émergence

Ce qui lie les systèmes complexes à la géographie est certainement la propriété de l'émergence. Certains systèmes complexes, en effet, convergent vers des états ou des cycles limites. Dans le cas d'une telle convergence, le système complexe ne montre pas un développement chaotique mais offre des issues similaires lors même d'écarts importants dans ses conditions initiales – ce sont précisément ces issues que l'on dit émergentes.

De son côté, la géographie est la science par excellence opérant avec la notion d'échelle. Or, pour passer d'une échelle phénoménale à une autre, nous avons besoin d'une notion qui nous permette de saisir ce passage; et cette notion est à nouveau celle de l'« émergence ». Que signifie donc cette notion clé?

« L'émergence, c'est donc l'entrée en scène des forces; c'est leur irruption, le bond par lequel elles sautent de la coulisse sur le théâtre, chacune avec la vigueur, la jeunesse qui est la sienne. »

C'est ainsi que la saisit Michel FOUCAULT [1971], lorsqu'il explore la notion d'« Entstehung » chez NIETZSCHE. Dans cette description, en apparence très éloignée de notre sujet, s'esquisse déjà un aspect essentiel de l'émergence: nous voyons qu'elle consiste en l'apparition au monde de quelque chose d'actif et d'effectif qui, dans un temps ou dans un espace en deçà de cette apparition, n'existait pas. L'émergence est le processus de cette apparition.

Dans le cadre géographique qui est le notre, nous devons bien sûr étayer cette définition en précisant ce qui émerge, où et comment. *Ce qui émerge*, dans les sciences humaines en général, est un « comportement collectif ou une structure globale »³⁸. *Où* cela émerge est, par définition, à « un niveau d'organisation supérieur »³⁹, c'est-à-dire, dans le domaine du « macro »; en géographie, nous appellerons ce domaine celui de l'échelle plus petite ou plus générale. Dernièrement, le *comment* de l'émergence procède des « interactions entre les éléments du système au niveau le plus simple », c'est-à-dire, du domaine du « micro ».

Pour plus de clarté, illustrons l'émergence ainsi définie par le phénomène de la ville, connu à tout géographe :

« Une ville peut être considérée comme un ensemble d'acteurs élémentaires (par exemple, les ménages, les entrepreneurs, les responsables municipaux) qui, en interagissant, produisent à un niveau supérieur d'observation des formes urbaines (par exemple des quartiers aux fonctions et aux compositions différenciées). Ces formes urbaines [sont] construites 'involontairement' par le jeu d'acteurs qui ajustent continuellement leur comportement en fonction des interactions qu'ils ont entre eux et des changements des conditions intervenant dans l'environnement de la ville [...] »⁴⁰

³⁸ COCU, CARUSO [2002], 2.

³⁹ *ibid.*

⁴⁰ PUMAIN, SANDERS, SAINT-JULIEN [1989]. Nous verrons plus tard pourquoi cette description est plutôt celle d'un phénomène émergent en général que celle d'un phénomène d'auto-organisation, contrairement à ce qu'indiquent les auteurs.

Cet exemple nous révèle deux propriétés essentielles de l'émergence. Tout d'abord, nous voyons qu'à une certaine échelle surgissent des propriétés globales absentes au niveau local: par exemple, alors qu'un ménage à lui seul n'est jamais une ville, un ensemble articulé de ménages acquiert cette propriété. On retrouve ainsi l'idée déjà présente chez ARISTOTE⁴¹ d'une totalité ontologiquement supérieure à la somme de ses parties. D'autre part cependant, nous observons une modification du statut ontologique des éléments constitutifs eux-mêmes. Ainsi, nous voyons qu'en entrant en relation avec d'autres individus, un sujet se resitue à une échelle supérieure au sein de laquelle il devient citoyen⁴². *En tant qu'acteur* au sein de cette échelle, cependant, il perd également un nombre de ses autres propriétés – non seulement celle d'être constitué de molécules organiques mais également celle de porter en soi des souvenirs et des images qu'il véhicule et qui le constituent, à lui-même, en tant qu'individu. Non pas qu'il perdrait ces propriétés dans l'absolu – il ne les entraîne simplement pas avec soi dans certaines échelles. Car le fait d'être physiquement composé de molécules organiques *n'entre pas* dans l'échelle phénoménale de la cité, pas plus que le fait que tel arbre évoque à un sujet donné un souvenir de grillades plutôt qu'un souvenir de lecture de KANT. À des échelles d'organisation plus générales encore, l'individualité même du sujet s'efface.⁴³

Ainsi, pour notre part, nous voulons ajouter au principe aristotélicien du tout ontologiquement supérieur à la somme des parties celui de la partie ontologiquement supérieure à la division de la totalité. Étant donné que les deux principes postulent une discontinuité ontologique reliée à tout changement d'échelle, nous pouvons les joindre en un seul, auquel nous donnons le nom de **discontinuité trans-scalaire**.

Quantitativement, le principe de discontinuité trans-scalaire implique que chaque échelle possède ses propres variables qui ne sont qu'en partie héritées par des échelles au-dessus ou en dessous. Méthodologiquement, il implique que lorsque l'on analyse un objet – lorsque l'on le décompose en ses parties – il perd certaines de ses propriétés et en gagne d'autres, strictement absentes à l'échelle d'étude originelle. Le travail analytique lui-même produit ainsi de nouvelles ontologies, donnant naissance à des éléments imprévisibles à l'échelle globale. Le travail synthétique, lui, consiste à comprendre *comment* se (re-)constitue le macro-phénomène à partir des « pièces détachées » ainsi obtenues. Ce travail dépasse la synthèse classique, étant donné qu'il s'agit de retrouver des propriétés *inexistantes* dans les éléments obtenus par la démarche analytique. Comme le fait remarquer O'SULLIVAN [2004], c'est justement par cet acte de reconstruction, dans la simulation, que la méthodologie dynamique d'un AC se différencie d'un réductionnisme classique.

L'émergence, bien sûr, n'est pas un concept purement géographique mais un concept général des sciences modernes. Ainsi, par exemple, la forme d'un cristal est un phénomène émergent de la relation entre les structures moléculaires des éléments qui le composent. D'autre part, lorsque des formes émergentes sont générées à l'aide de la simulation d'un AC, celles-ci n'ont pas nécessairement une interprétation géographique. La même forme émergente, en effet, peut souvent être interprétée de diverses manières. Si nous prenons l'exemple des modèles de *percolation* ou

⁴¹ ARISTOTE, *Des parties des animaux*, 1,1; *Politeia*, I, IV, 5.

⁴² cf. OUREDNIK [2004c], 133-134.

⁴³ Cela renvoie encore une fois à une réalité étendue irrévocablement au delà *et en deçà* de l'échelle du sujet humain, et du géographe par extension.

d'agrégation limitée par diffusion – qui dérivent du celui de réaction-diffusion⁴⁴ de TURING (Figure 3) –, nous pouvons nous servir des formes générées par ces modèles pour saisir aussi bien le phénomène de percolation d'eau dans un sol perméable que celui de l'étalement urbain d'une ville balnéaire. L'un des présupposés de la pertinence d'une *métaphore cellulaire*, à laquelle nous reviendrons ultérieurement (14), est d'ailleurs l'existence de tels homomorphismes.

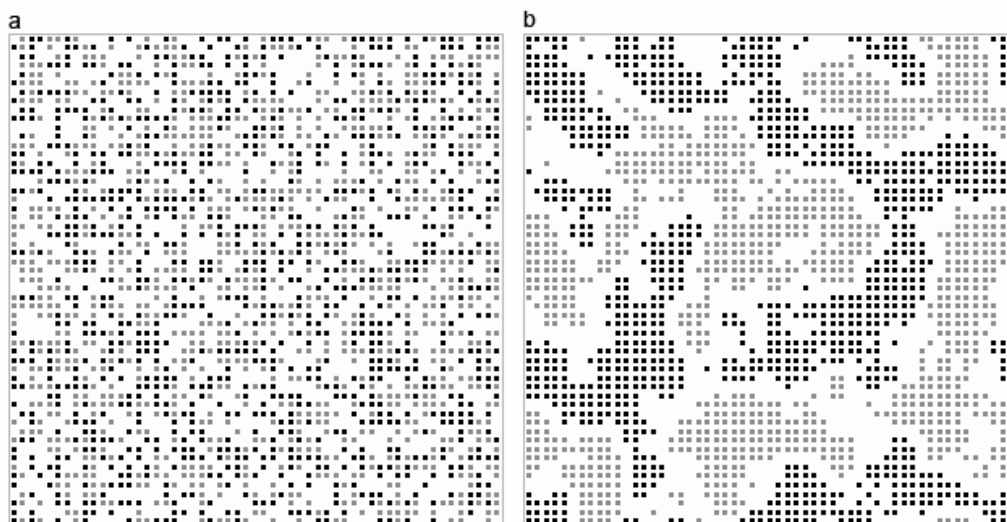


Figure 2: L'émergence de patterns de ségrégation au sein du Modèle de ségrégation de SCHELLING [1971, 1978]: (a) configuration initiale; (b) configuration émergente, stabilisée à la fin du processus de ségrégation. (Généré avec NETLOGO)

La géographicité des phénomènes émergents simulés dépend donc essentiellement de l'aptitude de tel ou tel modèle complexe à servir de schéma explicatif (*cf.* 12) d'un phénomène géographique; elle dépend de l'interprétation qu'un géographe est en mesure de donner aux formes obtenues dans la simulation du modèle. Bien sûr, certaines formes se prêteront plus que d'autres à une telle interprétation. Parmi les modèles d'émergence typiquement géographiques, citons peut-être le célèbre modèle de *ségrégation* de SCHELLING⁴⁵ (Figure 2).

Ce qui permettra, généralement, de procéder à l'interprétation d'une forme dynamique émergente en termes d'un phénomène de géographie humaine est l'identification d'une subjectivité intentionnelle, d'un Soi, dont le modèle cellulaire représente le comportement. Voyons de plus près ce qu'est une telle *subjectivité modélisée*.

⁴⁴ Pouvant être appelé croissance-diffusion (DAUPHINÉ [2003], 152).

⁴⁵ SCHELLING [1971, 1978].

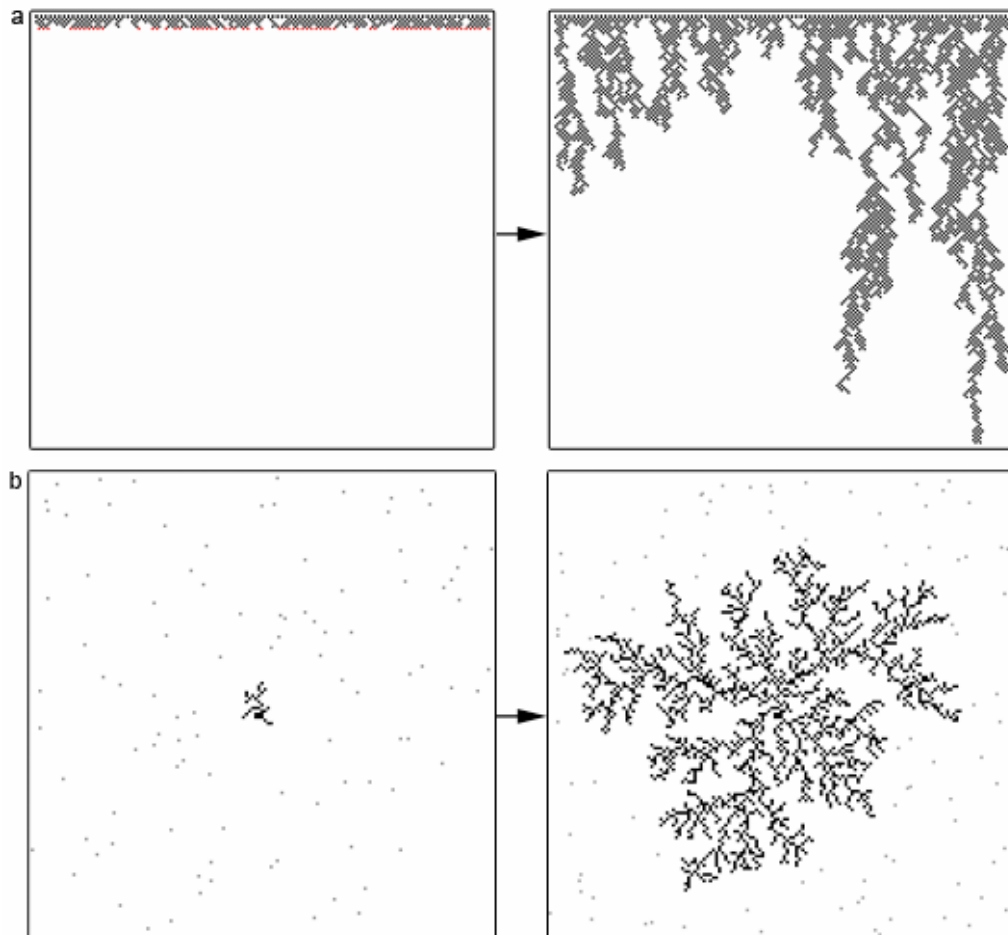


Figure 3: Émergence de formes dendritiques au sein des modèles dérivant du modèle de croissance-diffusion: (a) « Percolation » ou « diffusion contrainte par substrat »; (b) « DLA » ou « agrégation limitée par diffusion ». Les deux modèles peuvent être utilisés pour simuler l'étalement urbain d'une ville balnéaire, pour a, ou d'une ville concentrique, pour b. Dans les deux figures, nous reconnaissons clairement un pattern, qui pourtant n'est aucunement prévu dans les dynamiques ayant mené à son apparition. Les comportements individuels ne tendent pas vers ce pattern, ils le produisent de manière parfaitement aveugle. (Généré avec NETLOGO)

5.2 Les autophénomènes

Les notions d'émergence, d'auto-organisation, d'auto-reproduction et d'autopoïèse sont des notions morphogénétiques intimement liées. Ce ne sont néanmoins que les trois dernières de celles-ci qui invoquent spécifiquement un sujet, identifié, par exemple, au « self » (αὐτός, Soi) de la « self-reproduction »⁴⁶. Au vu de cette implication d'un Soi, il nous semble propice de regrouper l'ensemble de ces notions en les désignant comme **autophénomènes**. Mais comment ce Soi apparaît-il au sein de ces notions et comment devrait-il apparaître?

La plupart des chercheurs étudiant les autophénomènes distinguent chez eux entre un intérieur – le phénomène lui-même, considéré comme entité autonome; et un extérieur – l'environnement *de* cette entité⁴⁷. Cette distinction n'est pas sans poser d'importantes difficultés que nous pouvons résumer au fait qu'aucun phénomène, quel qu'il soit, ne peut être réellement et strictement extrait de son contexte, cela même en abstraction. Un tel problème est déjà relevé par exemple par les inventeurs de la notion d'autopoïèse:

« If one says that there is a machine *M*, in which there is a feedback loop through the environment so that the effects of its output affect its input, one is in fact talking about a larger machine *M'* which includes the environment and the feedback loop in its defining organization. »⁴⁸

Les dernières conséquences de cette observation de MATURANA et VARELA permettent heureusement déjà d'esquisser une solution au problème impliqué. Car, à prolonger leur raisonnement, il apparaît que le Soi et son environnement ne sont que les deux aspects d'un tout indissociable qui seul constitue l'objet géographique proprement dit. Ainsi, lorsque le géographe objective un sujet, il objective en fait un environnement, un *horizon*⁴⁹ particulier dont le Soi est le centre – cet *horizon* englobant strictement tout ce qui est invoqué dans l'existence du Soi donné. La relation Soi–environnement ainsi objectivée est alors analogue à la relation Moi–horizon du géographe lui-même. Cette analogie, et cela est également d'une importance majeure, ne demeure néanmoins qu'analogie.

Car, alors que l'horizon phénoménal du Moi s'auto-constitue dans l'immédiateté de mon vécu, le Soi de mon objet d'étude ne lui est que légué – par moi-même. Dans un acte transcendant ma propre subjectivité – un acte de foi, pourrait-on dire – je *présuppose* son horizon propre afin de le *comprendre*. Mes gestes, par exemple, étant l'expression de mes intentions, je ne peux *comprendre* les gestes d'autrui qu'en termes d'intentionnalité. Cela me permet même de donner sens à ceux parmi ses gestes dont l'intention se dirige vers des choses absentes de mon horizon phénoménal immédiat – c'est d'ailleurs précisément ainsi que je peux, au travers de l'autrui conçu en tant que Soi, transcender mon propre horizon.

Cette réflexion est importante car elle donne la clé de la possibilité de modélisation d'un autophénomène – une clé consistant dans la nécessaire autoprojection du géographe au sein de son modèle. Car seule cette autoprojection, cette implication

⁴⁶ ETXEBERRIA, ÍBAÑEZ [1999].

⁴⁷ cf. « Auto-organisation » In: BRUNET, FERRAS, THÉRY [1992].

⁴⁸ MATURANA, VARELA [1973], 78.

⁴⁹ Nous empruntons, bien sûr, ce terme à la phénoménologie de HUSSERL; cela, néanmoins, sans prétendre à une équivalence entre notre notion d'horizon et le sien. Notre travail, comme annoncé dans l'introduction, ne se veut pas une exégèse.

consciente dans le modèle créé, permet au géographe de donner lieu à la dimension transcendante de l'αὐτός au sein de la structure dynamique on ne peut plus immanente de l'automate cellulaire. Ce n'est qu'ayant reconnu ce fait et cette nécessité que nous pouvons examiner les caractéristiques des autophénomènes et utiliser les notions de « système autonome » et de « son environnement » sans se rendre coupable de naïveté.

Quoi qu'il en soit, et malgré les difficultés qu'elles impliquent, les notions apparentées de l'autophénomène sont d'une grande utilité: Chacune à sa manière permet en effet de désigner, en un lieu précis dans l'espace, des objets singuliers, donnant ainsi à la géographie de quoi opérer en tant que science.

Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, consacrés à des autophénomènes particuliers, la possibilité formelle de cette désignation repose sur une définition de l'autophénomène en tant que phénomène présentant un développement allant dans le sens de l'augmentation localisée de la corrélation spatiale et dans le sens inverse de l'augmentation générale de l'entropie. Le champ spatial autocorrélé résultant nécessairement d'un tel développement constitue ce que l'on peut alors appeler le « lieu »⁵⁰ d'une « structure »; cela bien même que ce lieu, comme il faut toujours se rappeler, ne peut d'une part exister que relativement à une totalité entropique généralement désignée comme « environnement » et ne présente, d'autre part, aucune limite définissable de manière apriorique⁵¹.

5.2.1 L'auto-organisation

Du point de vue de la géographie humaine – de par la contribution notable de PUMAIN, SANDERS et SAINT-JULIEN⁵² – la notion d'auto-organisation se rattache aux travaux d'Ilya PRIGOGINE (1917-2003) et d'Isabelle STENGERS (1949-).

Au sein des recherches de PRIGOGINE, la notion d'auto-organisation fait référence à l'apparition spontanée de structures hautement organisées, appelées **structures dissipatives**, résultantes d'interactions dynamiques complexes. Généralement, dans les travaux de tiers construits autour de cette notion, le terme « **systèmes dissipatifs** » est utilisé comme synonyme de structures dissipatives. Le système, tout comme la structure, est alors conçu comme une entité distincte en interaction avec un environnement. Pour notre part et notre usage, nous voulons distinguer entre ces deux notions. Ainsi, pour nous, le terme « structure dissipative » désignera le Soi d'un phénomène émergent et le terme « système dissipatif » désignera l'horizon de ce phénomène. Il existera alors entre structure et système une relation centre–horizon dont nous avons traité plus haut.

Parce que, souvent, mêmes des écarts importants dans les conditions initiales d'un système dissipatif tendent à converger vers des structures similaires, ces derniers se distinguent des systèmes chaotiques dont les issues, nous l'avons vu, divergent fortement comme conséquence de la moindre variation des conditions initiales.

⁵⁰ « Lieu », ici, dans le sens de τόπος. cf. 8.

⁵¹ Tout champ, en effet, s'étend en principe sur l'ensemble de l'espace (cf. ESFELD [2002], 19). Si nous considérons par exemple un espace infini d'une entropie syntaxique maximale, et que, au sein de cet espace, nous observons un champ hautement autocorrélé, où sont les limites formelles de ce champ? La réponse à cette question n'est pas évidente, étant donné que même si l'on élargit progressivement ce champ à l'ensemble de l'espace donné, son autocorrélation ne décroîtra que de manière asymptotique.

⁵² Voir surtout PUMAIN, SANDERS, SAINT-JULIEN [1989].

Corrélativement à cette tendance convergente des systèmes dissipatifs, les structures dissipatives résistent aux perturbations matérielles et énergétiques dues à leur échange avec leur « environnement » et sont donc dites *robustes*⁵³ – une robustesse existant à la fois grâce à et malgré cet échange.

Malgré l'échange avec l'environnement, car l'apport extérieur exige une constante auto-(ré-)organisation, qui seule permet à la structure de conserver son identité.⁵⁴

Grâce à cet échange, car les structures dissipatives évoluent loin de l'équilibre thermodynamique et ont en conséquence besoin d'un constant apport extérieur afin de se maintenir. Ce que l'on appelle autonomie des systèmes auto-organiseurs est ainsi corollaire de leur caractère ouvert; sans les « perturbations » extérieures, ils ne pourraient exister; ils ont besoin du « bruit » pour évoluer.

Parce qu'il doit être ainsi constamment réacquis, on désigne l'état d'une structure dissipative comme **équilibre dynamique** ou **équilibre instable**.

L'« environnement », dont il est ici question, ne peut évidemment être conçu qu'en termes d'un champ spatial plus vaste, *englobant* le champ désigné comme « structure ». Dans notre terminologie, l'environnement équivaut ainsi au système dissipatif dans son ensemble, alors que la structure renvoie au champ *vaguement* délimité – donc vaguement distinct du système – montrant une autocorrélation élevée. Au cas où l'on voudrait poser tout de même des limites spatialement tranchées à ce champ – d'une manière qui nous semble peut-être quelque peu forcée – on se voit contraint d'invoquer la notion de **stigmergie**⁵⁵, qui désigne les interactions indirectes entre les agents d'un système auto-organisé, *transitant par l'environnement*. L'introduction de cette notion sera bien sûr nécessaire chaque fois que l'on voudra donner à un phénomène géographique considéré comme auto-organisateur des limites claires; lorsque, par exemple, on définira une ville par ses seules frontières administratives.

C'est, en effet, le phénomène de la ville qui constitue l'exemple canonique d'un système géographique auto-organisateur – elle est notre structure dissipative par excellence⁵⁶. Ce qui la rapproche d'une telle structure est non seulement son degré d'organisation complexe mais également les relations qu'elle entretient de manière nécessaire avec le reste du territoire. « Ces relations sont de nature très variée: échanges de matériaux, de personnes (migrations), d'informations, de décisions. » Sans elles, la ville ne pourrait se maintenir et « assurer sa survie en entretenant les constructions et les populations qui la composent »⁵⁷. Le système dissipatif où apparaissent les villes est alors le territoire lui-même ou, de manière plus ciblée, le système hiérarchisé des villes d'un continent. Un tel système fut notamment simulé à l'aide d'automates cellulaires dans les modèles SIMPOP⁵⁸ et SIMPOP2.

⁵³ La robustesse impliquant l'homéostasie, l'homéorhésie ou les deux.

⁵⁴ En effet, bien que le Soi d'un phénomène soit le résultat d'une projection de son observateur, cette projection elle-même cesse d'être possible au moment où une structure jusqu'ici observable se dissout dans l'entropie.

⁵⁵ Voir, p. ex., DAUPHINÉ [2003].

⁵⁶ Des exemples plus connus encore venant surtout des sciences physiques. Ainsi, comme structure dissipative est souvent évoquée la tache rouge de Jupiter, vortex gigantesque de gaz dans la haute atmosphère de la planète dont la durée d'existence excède largement la moyenne de temps que n'importe quelle molécule de gaz passe en son sein. Dans le cadre de notre terminologie, l'atmosphère de Jupiter peut ainsi être considérée comme un système dissipatif. À l'échelle de la météorologie terrestre, des structures analogues sont incarnées par les cyclones ou encore par les cellules de convection atmosphérique.

⁵⁷ PUMAIN, SANDERS, SAINT-JULIEN [1989], 24.

⁵⁸ SANDERS, PUMAIN, MATHIAN, GUÉRIN-PACE, BURA [1997].

Néanmoins, mise à part la ville, la notion d'auto-organisation peut être appliquée de manière générale, en géographie humaine, à tout phénomène relevant d'une dynamique émergente de mise en ordre d'un système social. Une majorité de chercheurs spécifie néanmoins que, pour que l'on ait à faire à un cas d'auto-organisation, cette mise en ordre doit résulter d'une *interaction* de ses éléments et non pas d'une intervention « extérieure » – à nouveau, seuls de rares auteurs énoncent de manière à la fois explicite et satisfaisante en quoi cet extérieur se distingue de l'« intérieur » constitué par le phénomène lui-même. À nouveau, seule la relation centre-horizon nous semble adéquate pour donner consistance à cette distinction. Le centre et le Soi d'un phénomène géographique est alors à chaque fois une perspective – celle de la ville, d'une structure économique, culturelle, religieuse, ethnique – choisie comme objet d'étude et dont l'horizon s'étend toujours à l'ensemble de la réalité.

5.2.2 L'autopoïèse

La notion d'autopoïèse est fortement apparentée à celle de l'auto-organisation. Sa source, ses référents canoniques et ses objets opérationnels ne sont néanmoins pas exactement les mêmes. L'autopoïèse, en tant que notion, ne remonte pas aux travaux de PRIGOGINE mais à ceux de Humberto MATURANA (1928-) et Francesco VARELA (1946-2001) qui la formulèrent, en s'interrogeant sur la nature du vivant. Un vivant qu'ils tentaient de saisir par le biais de la notion d'une **machine autopoïétique**, définie de la manière suivante, dans une publication célèbre de 1972:

« An autopoietic machine is a machine organized (defined as a unity) as a network of processes of production (transformation and destruction) of components which: (i) through their interactions and transformations continuously regenerate and realize the network of processes (relations) that produced them; and (ii) constitute it (the machine) as a concrete unity in space in which they (the components) exist by specifying the topological domain of its realization as such a network. »⁵⁹

Nous voyons, ici, le fort rattachement de la notion d'autopoïèse à la biologie systémique, l'entité qui la réalise étant conçue comme un réseau de *processus de production*. Contrairement au champ spatial des structures dissipatives auto-organisatrices, également, le domaine de cette production est entendu comme fermé, cela au point de posséder ses dimensions propres. Comme l'indiquent les auteurs:

« [...] the space defined by an autopoietic system is self-contained and cannot be described by using dimensions that define another space. When we refer to our interactions with a concrete autopoietic system, however, we project this system on the space of our manipulations and make a description of this projection. »⁶⁰

Un phénomène autopoïétique n'a ainsi pas de monde extérieur. Si l'on parle de *sa* régulation ou de *son* maintien *au sein* d'un monde, c'est que nous le projetons dans l'espace de notre propre autopoïèse. Ainsi, contrairement à une confusion largement répandue, le domaine topologique d'un phénomène autopoïétique n'est pas simplement défini par l'existence d'une membrane cellulaire.

⁵⁹ MATURANA, VARELA [1973], 78.

⁶⁰ MATURANA, VARELA [1973], 89.

La notion de membrane, ou plutôt de frontière d'un système (Systemgrenze) n'est cependant pas étrangère à la notion d'autopoïèse. Elle joue un rôle central dans l'identité des systèmes autopoïétiques, tels qu'ils sont décrits dans la théorie des systèmes de Niklas LUHMANN (1927-1998), à qui l'on doit la transposition de la notion d'autopoïèse dans le champ de la recherche en sciences sociales. Bien que l'intégration de la notion de frontière apparaisse ainsi étrangère à la notion originelle, c'est précisément cette intégration qui rend la notion d'autopoïèse particulièrement « pertinente pour analyser des territoires entourés de limites nettes, insérés dans un maillage administratif et politique »⁶¹...

Mise à part cette frontière les systèmes autopoïétiques fonctionnent d'une manière très similaire aux systèmes auto-organiseurs. Ainsi, les boucles d'autoréférence du réseau de processus de production qui constituent un système autopoïétique peuvent parfaitement être retrouvées entre les éléments d'une structure dissipative. À titre d'exemple, considérons cette description, parfaitement applicable à un système autopoïétique social, qui pourtant figure sous l'entrée « Auto-organisation » du *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*:

« Ainsi l'apparition, dans une conjoncture qui peut être en partie aléatoire, d'une activité nouvelle dans un lieu donné, déclenche des boucles de rétroaction positive: l'appel de main d'œuvre crée un marché de consommation; l'augmentation de la population du lieu donne naissance à un milieu plus favorable à l'initiative et à l'invention; la création d'infrastructures facilite le développement de la production. Tous ces effets convergent pour aboutir à une croissance multiforme du lieu de l'activité initiale, qui croît ainsi par un processus d'auto-renforcement. À partir d'un certain seuil, cependant, il arrive que les coûts de l'installation de nouvelles populations et de nouvelles activités augmentent au point de freiner la croissance: une boucle de rétroaction négative s'installe, qui complète et stabilise le système, désormais autorégulé. »⁶²

Faut-il alors distinguer l'autopoïèse de l'auto-organisation? Malgré leur ressemblance, nous pensons que oui, et cela pour deux raisons. Tout d'abord, la notion de membrane ou de frontière nous semble, malgré tout, d'une grande utilité dans le cadre qui est le notre.

D'autre part, la notion d'autopoïèse recèle une particularité étymologique, qui – bien qu'elle ne soit probablement pas même voulue par Maturana, qui explique sa terminologie simplement par la différence entre action et production⁶³ – nous semble très intéressante. En effet, lorsque nous remontons aux sources étymologiques du mot, nous retrouvons la *ποίησις* aristotélicienne qui, opposée à la *πρᾶξις*, est une activité qui n'a pas soi-même mais un produit extérieur pour but; elle n'est pas son propre bien mais sert à un bien distinct d'elle-même⁶⁴. Par cela, l'existence d'une entité autopoïétique procède par une constante *fabrication* d'un Soi qui, toujours déjà, est étranger à cette existence même. L'existence, soit-elle celle d'un être vivant ou d'une

⁶¹ DAUPHINÉ [2003], 146.

⁶² SANDERS, DURANT-DASTÈS, « Auto-organisation » In: LÉVY, LUSSAULT [2003]. La notion d'« autopoïèse » est par ailleurs absente du dictionnaire LÉVY, LUSSAULT [2003] de même que du dictionnaire BRUNET, FERRAS, THÉRY [1992]. Cela laisse croire que la majorité des géographes opérant avec les autophénomènes choisissent de ne pas distinguer entre les deux notions (cf. PUMAIN, SANDERS, SAINT-JULIEN [1989], 24; où « autopoïèse » et « auto-organisation » sont utilisées comme synonymes).

⁶³ « [...] Don Quixote's dilemma of whether to follow the path of arms (*praxis*, action) or the path of letters (*poiesis*, creation, production) [...] »: MATURANA, VARELA [1973], xvii.

⁶⁴ Voir: ARISTOTE, *Éthique à Nicomaque*, livre 6: 1140b; cf. livre 1: 1094a.

ville, apparaît ainsi comme une permanente aliénation du Soi dans sa propre matérialité. Dans ce sens, la notion d'autopoïèse s'approche déjà de celle de l'autoreproduction – notion qui ne renvoie pas à la capacité d'un système de se maintenir mais de produire une copie de soi-même en un autre lieu ou en un autre temps. Mais le maintien d'un système social ne pourrait-il pas, après tout, être considéré comme une telle autoreproduction constante d'un Soi, dont le produit est toujours un Soi futur, c'est-à-dire, se trouvant dans le même espace mais dans un autre temps?

Une réponse positive à une telle question apparenterait non seulement l'autopoïèse mais également l'auto-organisation à la notion d'autoreproduction. Une réponse négative, de son côté, mettrait en doute la pertinence de l'usage de la notion d'autoreproduction au sein de la géographie humaine. En conséquence, bien que nous n'ayons pas l'intention de nous y consacrer ici, une telle question nous semble digne d'une recherche approfondie à mener dans autre travail.

5.2.3 L'autoreproduction

Quel que soit l'adéquation de la notion d'autoreproduction à la description de la dynamique d'un système social et vivant, il nous est important de la considérer. Cela surtout parce qu'elle nous permet de mieux comprendre le contexte historique des AC, et d'éclairer un nombre de concepts centraux.

Remarquons d'abord que la recherche de VON NEUMANN – qui aboutit à la formulation d'un premier AC⁶⁵ – était animée précisément par le désir de concevoir une « machine autoreproductrice » : le « kinématon » que nous avons évoqué dans le chapitre 2. C'est aux multiples aboutissements de cette recherche que l'on doit notamment distinction entre autoreproduction *triviale* et *non-triviale*, la première étant caractérisée par la maximisation de l'entropie comme limite du développement du système, la deuxième par la conservation – voir diminution – de l'entropie couplée à une conservation – voir augmentation – de la complexité.

VON NEUMANN découvrit d'autre part que tout système autoreproducteur, pour sortir d'une impasse logique, devait nécessairement consister en un constructeur-copieur universel, capable non seulement de construire un quelconque objet – y inclus soi même –, en partant d'une description et mettant à son usage les objets de son monde, mais également de distinguer entre une phase d'*interprétation* de sa propre description et une deuxième phase de *copie* de cette description même; une distinction aucunement triviale pour un automate mathématique abstrait.⁶⁶ Notons que, étonnamment, le principe du constructeur-copieur universel correspond à celui du processus biologique de la méiose⁶⁷, découvert deux ans plus tard.

C'est en 1966 que von Neumann réussit à démontrer la possibilité de construire un tel constructeur-copieur universel au sein d'un automate cellulaire. Des recherches

⁶⁵ La logique de la machine autoreproductrice fut formulée en 1948 et publiée chez NEUMANN J. von [1951]. Le premier AC fut conçu entre 1952 et 1953 et publié chez NEUMANN J. von [1966].

⁶⁶ Pour une preuve détaillée montrant la nécessité pour une machine autoreproductrice d'être un constructeur-copieur universel, voir FATÈS [2001], 7 ainsi que ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999], 306.

⁶⁷ Publié chez: WATSON J., CRICK F. [1953], « Genetic implication of the structure of deoxyribonucleic acid » In: *Nature* (171), pp. 964-967.

ultérieures⁶⁸ ont démontré que l'ordre de grandeur d'un système autoreproducteur concret, réalisant une telle « machine » au sein d'un AC du type du **Jeu de la Vie** serait de l'ordre de 10^{13} cellules organisées d'une façon complexe et précise. Cet ordre de grandeur fut alors désigné comme « seuil de complexité » en deçà duquel l'autoreproduction n'est point possible.

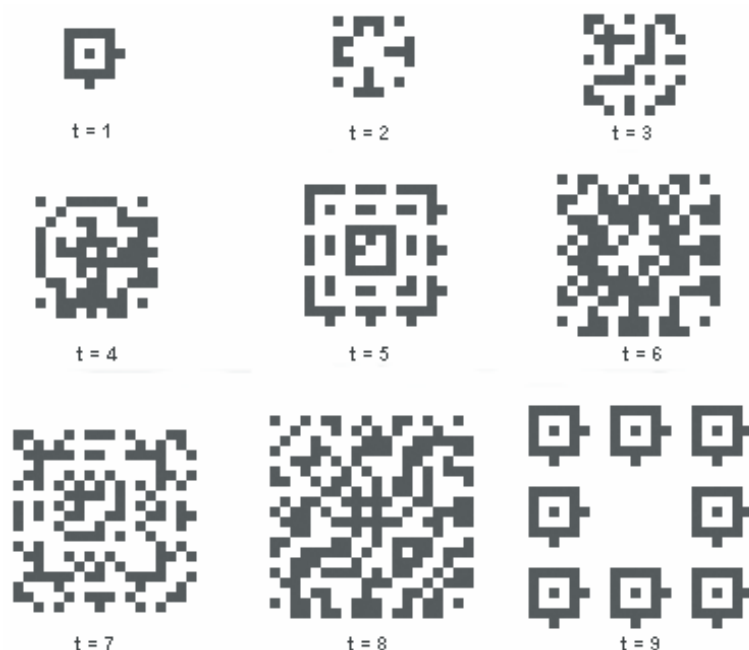


Figure 4: Un exemple d'autoreproduction modélisée par AC: le Compteur de Parité de FREDKIN. Selon sa fonction de transition, une cellule est active au temps $t+1$ ssi elle a un nombre impair de voisines au temps t – cela indépendamment du fait si, oui ou non, elle est active en t . Une telle règle a pour propriété de reproduire toute forme initiale après un certain nombre d'itérations. (Généré à l'aide du CELLULAR AUTOMATA VIEWER)

Plus tard, néanmoins, des systèmes autoreproducteurs radicalement plus simples que celui de VON NEUMANN furent découverts. LANGTON, entre autres, observa que la capacité de construction universelle n'était pas une condition nécessaire de l'autoreproduction. Nous avons ainsi des systèmes autoreproducteurs consistant en une description purement dynamique⁶⁹ – comme le **Loop de Langton** – ou même des modèles dépourvus de description – comme ceux qui procèdent par auto-inspection, ainsi que le proposent ETXEBERRIA et IBÁÑEZ [1999]. En effet, même un AC doté d'une fonction de transition aussi simple que le **Compteur de Parité de Fredkin** (Figure 4) permet l'autoreproduction. Même au sein de ces modèles, néanmoins, un seuil de complexité peut être conçu; formulé, peut-être, en d'autres termes⁷⁰.

⁶⁸ POUNDSTONE W. [1985] *The Recursive Universe: Cosmic Complexity and the limits of scientific knowledge*. New York: Morrow. Cité dans DENNETT [1995], 173

⁶⁹ Des modèles dépourvus d'une description à part qu'ils auraient à interpréter.

⁷⁰ À titre d'exemple, ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999], 312 proposent de considérer le seuil de complexité du point de vue de la *compactitude* (*compactness*) de la description d'un système.

Nous voyons qu'en principe, la notion d'autoreproduction s'inscrit surtout dans le questionnement sur la notion du vivant et apparaît ainsi comme adéquate plutôt aux objets des sciences de la vie. Son utilité en géographie humaine n'est pas pour autant exclue.

D'abord, pour les raisons évoquées dans le chapitre précédent, l'autoreproduction peut d'un certain point de vue être considérée comme une notion équivalente de l'auto-organisation et de l'autopoïèse. D'autre part, l'auto-reproduction par auto-inspection offre un point de vue fort intéressant sur les processus de l'aménagement de l'espace et de la création des structures sociales en général. En effet, si nous considérons par exemple les grands agglomérats de maisons identiques, que nous pouvons trouver dans les « suburbs » résidentiels des États-Unis, une interprétation de l'étalement de telles zones en termes d'autoreproduction des dites maisons familiales semble plus que pertinent. L'algorithme d'auto-inspection et -reproduction s'accomplit alors par le biais des actes et désirs des ménages et architectes qui construisent et habitent de telles structures. À une échelle plus globale, l'instauration de régimes politiques identiques dans divers pays du monde ne peut-elle pas, elle aussi, être interprétée en termes d'auto-reproduction? Dans tous les cas, un tel mécanisme autoreproducteur serait simulable par un automate cellulaire.

II. Une définition géographique et formelle des Automates Cellulaires

Dans le chapitre précédent, nous avons défini le contexte des automates cellulaires ainsi que les notions fondamentales qui y sont liées. Il s'agit, à présent, de définir de manière explicite notre objet lui-même. Le présent chapitre définit les automates cellulaires et donne, pour les diverses formes que ceux-ci peuvent adopter, une classification spatiale.

6 Les éléments constitutants

Un automate cellulaire est un système dynamique, à la fois spatialement et temporellement discret. Il est nomologiquement circonscrit par une abstraction algorithmique dont les composantes sont les *lieux*, les *états* de ceux-ci et une *fonction de transition* permettant aux lieux de changer d'état.

Dans leur forme canonique, établie depuis le début des années 1970¹, les AC furent déjà maintes fois introduits et expliqués dans diverses publications géographiques¹; c'est à celles-ci que nous référons le lecteur non-initié. Car bien qu'une familiarité avec les AC ne soit point nécessaire à comprendre les développements du présent chapitre, elle peut la faciliter grandement. D'autre part, le lecteur intéressé par le formalisme originel des AC, tel qu'il fut développé par les inventeurs du modèle, préférera consulter d'abord les ouvrages fondateurs de VON NEUMANN, CODD et GARDNER.

En effet, la façon dont nous voulons présenter les AC ici s'écarte de manière importante des explications traditionnelles. Nous n'avons, bien sûr, pas choisi cet écart par originalisme, mais parce qu'il nous apparaît comme nécessaire au vu du sujet qui est le notre, c'est-à-dire, au vu des exigences d'une épistémologie géographique. Afin de satisfaire ces exigences, notre formalisme devra intégrer trois optiques distinctes mais nécessairement unifiées dans notre approche.

Tout d'abord, nous devons intégrer de manière précise et explicite tous les éléments constitutifs d'un AC. Cette intégration devra néanmoins se faire tout en évitant d'enfermer ces éléments dans un de leurs aspects particuliers. Un fort rejet du modèle cellulaire en géographie humaine repose en effet sur la mise en avant de l'inadéquation de *certain*s modèles cellulaires aux questionnements de la discipline. Nous tenterons donc rendre notre formalisme aussi *généralisable* que possible, de manière à pourvoir exprimer par son biais une large palette de modèles de type cellulaire.

Deuxièmement, nous intégrerons à notre formalisme des éléments de notation de la *logique des prédicats*, qui seuls nous permettront de soumettre les éléments constitués à une analyse philosophique que nous devons inévitablement développer dans les chapitres ultérieurs.

Dernièrement, vu que la statistique – et en particulier la *statistique spatiale* – fait aujourd'hui intégralement partie de l'enseignement géographique, c'est également dans sa notation que nous puiserons, afin de rendre les simulations de notre AC examinables par les méthodes qu'elle propose. Tout AC consistant nécessairement en une matrice d'individus, des éléments de la notation de statistique spatiale s'imposeront d'ailleurs souvent d'eux-mêmes.

Conçu ainsi dans un souci d'ouverture et de généralisation, le formalisme proposé pourra parfois apparaître comme fort complexe. Nous tacherons de l'alléger dans la mesure du possible tout en assurant le lecteur de la nécessité de certaines formulations pour la compréhension du présent mémoire dans son ensemble.

¹ TOBLER [1979]; LANGLOIS, PHIPPS [1996]; DAUPHINÉ [1995, 2003]; COUCU, CARUSO [2002] etc.

6.1 Les lieux

Les éléments derniers d'un AC sont d'habitude, et fort logiquement, nommés « cellules ». Pour notre part, cependant, par souci d'éviter des connotations biologiques pas toujours appropriées en géographie humaine, nous nommerons dès maintenant ces éléments « **lieux** ». Ce n'est que l'adjectif « cellulaire » que nous conserverons, par commodité, dans la suite de ce travail.

Ce que sont ces éléments derniers d'un AC peut être considéré, une fois encore, d'un point de vue dynamique ou statique. Commençons, comme dans notre examen de la complexité, par le point de vue statique.

De ce point de vue, les lieux d'un AC peuvent d'abord être considérés comme les *variables d'objets* de la logique des prédicats. Si x est un lieu et que B est une propriété – comme « contenir des bâtiments à usage commercial » – nous pouvons énoncer que telle et telle unité discrète du monde contient des bâtiments à usage commercial par l'expression « $B(x)$ », où B est un *prédicat* de x . Comme dans la logique des prédicats, il est alors possible formuler des *propositions* comme $\forall x(B(x))$, « toutes les unités discrètes du monde contiennent des bâtiments à usage commercial » ou $\exists x(B(x))$, « il existe au moins une unité spatiale contenant des bâtiments à usage commercial ».

Néanmoins, déjà d'un point de vue statique, les lieux d'un AC se distinguent de simples variables d'objets, utilisées dans la logique des prédicats. Cela d'abord par le fait que tout lieu x est d'emblée considéré comme faisant partie d'un *ensemble*, noté X et englobant tous les lieux de ce que l'on appellera, justement, un « automate cellulaire ». Ainsi, tout AC est d'abord un ensemble $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$, où n est le nombre total des lieux. Pour nous référer à ces lieux, nous utiliserons la notation suivante:

X pour désigner l'ensemble des lieux d'un AC.

x_i pour désigner un lieu $x_i \in X$ particulier.

La plus grande divergence entre les lieux d'un AC et les variables d'objets s'affirme cependant dans la nature dynamique du modèle. Ce n'est, en effet, que d'un point de vue dynamique – dans lequel, réside, par ailleurs, la spécificité même du modèle cellulaire – que chaque lieu apparaît comme un **automate**, c'est-à-dire, comme *un objet mathématique défini en tant que « système capable de se placer dans un certain nombre d'états [...] susceptible de recevoir d'un environnement une donnée à laquelle il réagit en changeant d'état et en produisant éventuellement une sortie. »*²

Dans le vocabulaire des automates, une telle « donnée reçue de l'environnement » est généralement nommée **entrée**. Dans le cas particulier des automates *cellulaires*, de telles entrées consistent, pour chaque lieu, dans les valeurs des prédicats d'un ensemble d'autres lieux, que, plus tard, nous nommerons « voisins » (cf. 6.3). La **sortie** d'un lieu ne sera autre que son propre *état*, dans un temps immédiatement futur. C'est ainsi, en tant qu'automates prenant en compte des entrées présentes et produisant des sorties définissant le futur, que les lieux d'un AC se révèlent comme porteurs de ce que nous nommerons la *fonction de transition*. Ce que sont ces états et ces fonctions de transition est ce qu'il nous faut définir à présent.

² MARCHAL [1990], « Automate ».

6.2 Les états

Le prédicat du lieu d'un AC est un élément tout à fait analogue à ce qui est nommé « prédicat », dans la logique des prédicats. De même qu'au sein de cette logique, où il n'y pas de variables d'objet sans prédicat associé, il n'existe pas, dans un AC, de lieu sans prédicat. Chaque lieu en a donc au moins un. Ainsi, par exemple, même un lieu qui ne serait « rien » possède au moins le prédicat de ne rien être. C'est par ce prédicat qu'il se distingue des autres lieux et acquiert par-là une effectivité. Son « rien être » géographique est par cela un prédicat au même titre que « contenir des bâtiments à usage commercial » ou « être un terrain arable ».³

L'ensemble des prédicats d'un lieu constitue ce que l'on appelle son **état**. Nous noterons cet ensemble H et chacun des prédicats qui le composent η_a , avec $H = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{n-1}, \eta_n\}$. Conformément à la notation adoptée plus haut nous écrirons:

$H(x_i)$ pour désigner l'état d'un lieu x_i .
 $\eta_a(x_i)$ pour désigner un prédicat particulier de x_i .

En ce point, cependant, deux concepts divergents du prédicat se présentent à nous. Selon le premier, η_a peut être considéré comme une variable binaire dont la présence ou l'absence dans la notation indique la présence ou l'absence d'une propriété associée à un lieu. Une telle abstraction est tout à fait adéquate dans le cas où la propriété désigne se qu'*est*, géographiquement, ce lieu; lorsque, par exemple, η_a est la propriété d'*être* une zone commerciale, ou d'*être* une zone industrielle. Dans d'autres cas, cependant, cette conception du prédicat entraîne un grand problème de praticabilité.

Imaginons par exemple que η_a soit la propriété de « contenir une population de cent personnes ». Nous voulons à présent désigner un quartier, noté x_i , contenant cent cinquante-trois personnes. Dans ce cas, l'expression $\eta_a(x_i)$ n'est que très approximativement correcte. Il s'avère donc nécessaire de concevoir une propriété η_b , rapportant le nombre exact des habitants. Cette propriété ne tiendra à son tour que jusqu'à la prochaine variation démographique, forçant l'introduction d'une propriété η_c , η_d , η_e , η_f , etc.

Pour empêcher une telle prolifération illimitée et inutile, il convient d'adopter le deuxième concept du prédicat, qui consiste à concevoir tout η comme une variable stockant une valeur. Dans ce sens, η peut également être utilisé comme un opérateur possédant la signification suivante:

$\eta_a(x_i)$ renvoie la valeur de la variable η_a de x_i .
 $H(x_i)$ renvoie une matrice de valeurs $\{\eta_1(x_i), \eta_2(x_i), \dots, \eta_{n-1}(x_i), \eta_n(x_i)\}$.
 $\eta_a(X)$ renvoie une matrice de valeurs $\{\eta_a(x_1), \eta_a(x_2), \dots, \eta_a(x_{n-1}), \eta_a(x_n)\}$. Cette matrice correspond à ce qu'en statistique, on appelle *valeur d'un champ*; dans le contexte des SIG, nous avons à faire à une *couche d'information*.

³ Notons que ce lieu ne serait-il vraiment rien, au sens absolu, le désigner comme « ce » lieu serait absolument absurde; où, si l'on veut considérer la chose d'un autre point de vue encore, il n'y aurait simplement pas de lieu à désigner. Comme l'ont noté certains philosophes, notre rapport prédictif à l'Être nous empêche dans tous les cas de penser le rien.

$H(X)$ renvoie l'état de l'AC lui-même, c'est-à-dire, la configuration statique de l'ensemble d'un AC; la matrice de valeurs, représentant cette configuration correspond à ce qu'en statistique, on appelle la *matrice – multivariée – de données* et possède la forme suivante:

$$H(X) = \begin{pmatrix} \eta_1(x_1) & \eta_2(x_1) & \dots & \eta_{n-1}(x_1) & \eta_n(x_1) \\ \eta_1(x_2) & \eta_2(x_2) & \dots & \eta_{n-1}(x_2) & \eta_n(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_1(x_{m-1}) & \eta_2(x_{m-1}) & \dots & \eta_{n-1}(x_{m-1}) & \eta_n(x_{m-1}) \\ \eta_1(x_m) & \eta_2(x_m) & \dots & \eta_{n-1}(x_m) & \eta_n(x_m) \end{pmatrix}$$

Prenons, pour illustrer cela, l'exemple d'un AC représentant les pays du monde dont chaque lieu peut être caractérisé par un ensemble de cinq propriétés, disons:

- η_1 : la *population*, exprimée par un nombre naturel positif
- η_2 : la *croissance démographique*, exprimée par un nombre naturel
- η_3 : le *PIB per capita*, exprimé par une fraction ou par un nombre réel
- η_4 : le *système politique*, exprimé par une chaîne de caractères
- η_5 : le fait d'être *en guerre*, exprimé par une valeur binaire

Une expression comme la suivante est alors possible:

$$H(x_i) = \{6'523'000; 1.2; 30'000; \text{« démocratie directe »}; \text{FAUX}\}$$

Nous remarquons que certains prédicats peuvent prendre des valeurs de l'ensemble des nombres réels, comme le montre l'exemple du prédicat D. Les valeurs de prédicats sont ainsi l'unique élément non nécessairement discret d'un AC.

Nous voyons, au vu de cette notation, que chaque lieu d'un AC peut ultimement être considérée comme une *valeur de propriété localisée*. Lorsque l'on a affaire à un automate dont les états comprennent plusieurs propriétés, chaque lieu devient une *matrice localisée de valeurs de propriétés* – matrice localisée au sein d'une autre matrice qu'est l'automate cellulaire lui même.

Face à notre notation, l'informaticien notera la ressemblance poignante entre la façon cellulaire de concevoir un lieu géographique avec ses états et celle que l'on a de concevoir un objet avec ses variables au sein des langages orientés objet comme Java ou C++. L'épistémologue notera qu'un pays, conçu par le géographe au travers de ce modèle, est un objet de type $H(x_i) = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{n-1}, \eta_n\}$, c'est-à-dire, un objet abstrait défini par un identificateur relationnel – x_i – et cinq variables. Si un objet géographique peut vraiment être conçu en termes d'un tel ensemble de variables et, si oui, comment les choisir sera une question abordée dans la partie III de ce mémoire.

En ce qui concerne la définition mathématico-géographique de notre modèle, il ne nous reste à présent qu'à aborder la question Comment un lieu acquiert ses états? Dans les conditions initiales d'une simulation, ceux-ci seront attribués par le géographe lui-même, de manière homogène ou hétérogène pour l'ensemble des lieux. Par la suite cependant, au sein de la dynamique du modèle cellulaire, ces états changent d'une

manière autonome, déterminée par la **fonction de transition** – dernier élément du modèle cellulaire.

6.3 Da la fonction de transition à l'espace cellulaire

C'est en sa fonction de transition, portée par les lieux en tant qu'automates (cf. 6.1), que réside l'aspect dynamique d'un AC et qui dit dynamique, dit temps. C'est donc celui-ci qu'il nous faut introduire, à présent, dans le concept cellulaire et dans notre notation.

Le temps au sein d'un AC est discret, ce qui signifie qu'il peut être représenté par une matrice $T = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_\infty\}$ dont chaque élément correspond à une **itération**. Par rapport à la réalité, $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ représente un laps de temps effectif de longueur variable. Ainsi, le temps géographique révolu entre deux itérations consécutives peut correspondre à des milliers d'années, dans un modèle géologique, à une décennie, dans un modèle d'occupation du sol, à un jour, dans un modèle épidémiologique, voir à une fraction de seconde, dans un modèle du transport routier.

Conformément à notre notation, nous noterons $H(x_i, t_j)$ l'état d'un lieu en un temps t donné. L'état du même lieu en un autre temps s'exprimera alors comme $H(x_i, t_k)$. La fonction de transition nous permettra à présent d'établir un lien entre $H(x_i, t_j)$ et $H(x_i, t_k)$, de même qu'entre les états de lieux différents en temps différents. Nous exprimerons l'existence d'un tel lien par le symbole de la demi-flèche: « \rightarrow ». À titre d'exemple, le fait que $H(x_i, t_k)$ est déterminé par $H(x_i, t_j)$ s'écrira « $H(x_i, t_j) \rightarrow H(x_i, t_k)$ ». Cette fonction de transition – que nous noterons Φ – s'appliquera toujours de manière parfaitement *homogène* à tous les lieux de l'AC. Elle sera, de même, *invariante* avec le temps, car aucune fonction mathématique ne se transcende soi-même; même si son application variait avec le temps ou avec la localisation des lieux, cette variation elle-même serait toujours et encore prévue dans cette même fonction. La **parallélité** du temps de tous les lieux d'un AC est donc absolue.

Nous voulons nous imaginer une fonction de transition comme consistant en un ensemble de **règles de transition** mutuellement compatibles, notées ϕ , représentant chacune une relation de détermination. À part le cas d'**indépendance**, où aucune relation de ce type n'existe – et où Φ est alors un ensemble vide – le nombre de telles règles au sein d'une même fonction est potentiellement illimité. Chacune d'entre elles, néanmoins, prend l'une des quatre formes montrées dans la Figure 5. Exprimés de manière plus formelle, ces quatre formes peuvent être classifiées de la manière suivante⁴:

- a. La forme **épisodique**, où l'état d'un lieu dépend uniquement de la l'état du même lieu au moment précédant. Nous avons, comme relation de détermination:

$$\eta_a(x_i, t_n) \rightarrow \eta_a(x_i, t_{n+1}).$$
- b. La forme **séquentielle**, où l'état d'un lieu dépend de la séquence de ses états précédents. Nous avons, comme relation de détermination: $\{\eta_a(x_i, t_n), \eta_a(x_i, t_{n-1}), \eta_a(x_i, t_{n-2}), \dots, \eta_a(x_i, t_{n-m})\} \rightarrow \eta_a(x_i, t_{n+1})$. Nous disons que le système dynamique, décrit par une fonction de transition de ce type, possède une mémoire d'ordre m .

⁴ Cette classification reprend celle de TOBLER [1979], en actualisant les termes et les descriptions.

- c. La forme **multivariée**, où l'état d'un lieu dépend de l'état du même lieu au moment précédent, et que cet état est composé de plusieurs prédicats. Nous avons, comme relation de détermination: $H(x_i, t_n) \rightarrow \eta_a(x_i, t_{n+1})$; avec $|H| > 1$.
- d. La forme **géographique**, où l'état d'un lieu dépend de l'état de plusieurs lieux au moment précédent. Comme nous le verrons plus bas, l'ensemble de tels lieux influençant l'état de x_i sera désigné l'ensemble de ses « voisins » et sera noté $\Psi(x_i)$ – une notation qui nous permettra d'exprimer la relation de détermination comme: $\eta_a(\Psi(x_i, t_n)) \rightarrow \eta_a(x_i, t_{n+1})$; avec $|\Psi(x_i)| > 1$.

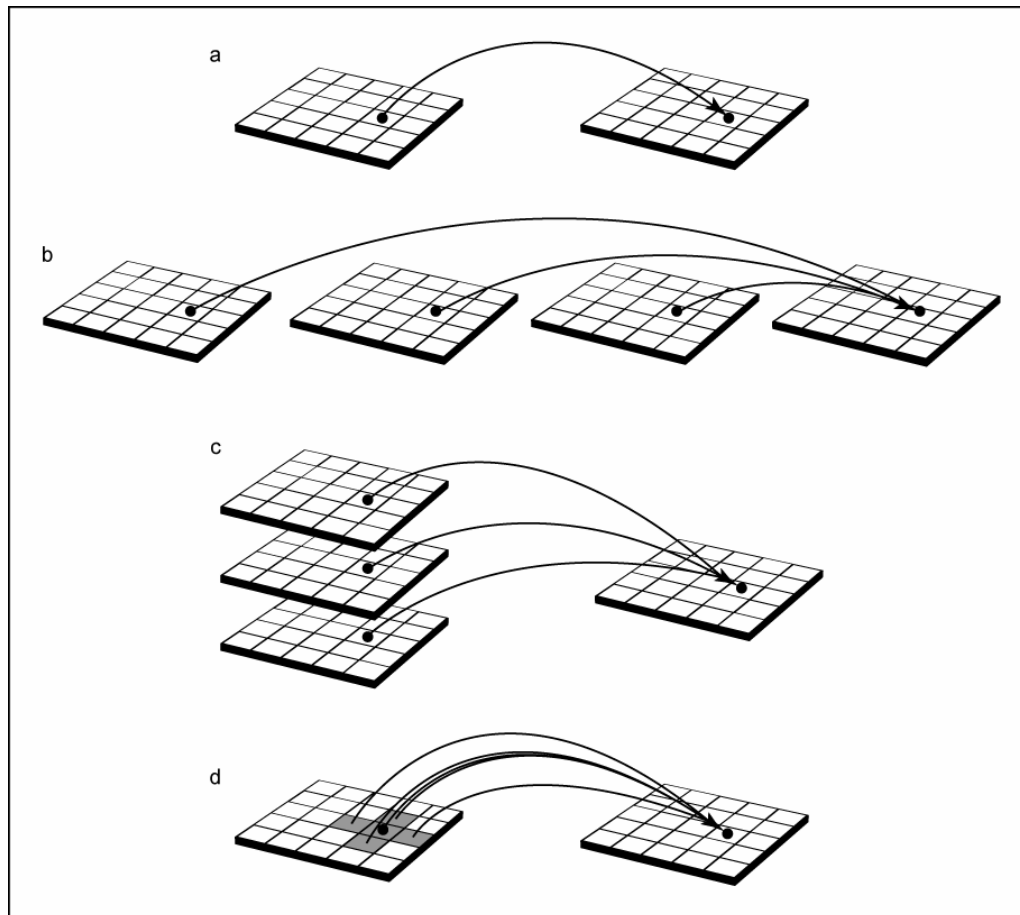


Figure 5: Quatre types de règles de transition: (a) forme épisodique, (b) forme historique ou séquentielle, (c) forme multivariée, (d) forme géographique (adapté de TOBLER [1979]). Notons que la forme bidimensionnelle de l'espace cellulaire ici représenté, de même que le voisinage de VON NEUMANN dans la figure (d) n'ont été adoptés que par souci de clarté. Comme nous le verrons plus bas (7), bien d'autres espaces sont possibles.

Dans certains modèles cellulaires, il est également possible de distinguer entre des règles déterministes et stochastiques. Pour rendre possible cette distinction, la forme d'une relation de détermination peut alors, par exemple, être présentée comme:

$$\eta_a(x_i, t_n) \xrightarrow{\alpha} \eta_b(x_j, t_{n+1})$$

Où α correspond à la probabilité que $\eta_a(x_i, t_{n+1})$ soit effectivement déterminé par $\eta_b(x_j, t_n)$. Dans une **règle déterministe**, α vaut toujours 1. Dans une **règle stochastique**, α varie entre 0 et 1.⁵

Dans une volonté de synthèse, nous pouvons résumer l'ensemble de ces formes dans l'énoncé suivant:

Toute règle de transition prend en compte un ou plusieurs prédicats d'un ou plusieurs lieux voisins de x_i , tels qu'ils étaient donnés dans une itération précédente où une dans une série d'itérations précédentes, pour déterminer la valeur d'un prédicat particulier de x_i au moment présent.

L'analyse de cet énoncé, conçu surtout afin de fournir une vue d'ensemble du fonctionnement dynamique d'un AC, nous permet d'identifier quelques autres catégories de règles de transition.

Nous pouvons ainsi, par exemple, distinguer entre les règles exhaustives et les règles totalistes. Alors qu'une **règle exhaustive** distingue entre les diverses voisines d'un lieu, une **règle totaliste** ne prend en compte que le *nombre* de ces voisines satisfaisant une certaine condition. Un exemple de règle totaliste est montré dans l'expression suivante:

$$\left(\sum_{x_j \in \Psi(x_i)} \begin{pmatrix} 1 & \text{si } (\eta_k(x_j, t_n) = 1) \\ 0 & \text{sinon} \end{pmatrix} \geq 3 \right) \rightarrow (\{\eta_l, \eta_m\}(x_i, t_{n+1}) = \{0, 1\})$$

Cette règle particulière énonce que si 3 ou plus parmi les voisins de x_i ont 1 pour valeur du prédicat η_k , x_i aura, dans l'itération suivante, 0 et 1 pour valeurs respectives des prédicats η_l et η_m . Notons, dans cet exemple, qu'une flèche entière, « \rightarrow », est utilisée, vu qu'il ne s'agit pas, ici, d'une relation de détermination conçue de manière générale mais d'une détermination explicite, donnant au prédicat d'un lieu une valeur précise.

Une dernière distinction peut encore être faite entre des **règles conditionnelles**, du type de l'équation précédente et les **règles inconditionnelles**. De telles règles seront le plus souvent utilisées pour exprimer des équations mathématiques – aux différences – qui définissent les valeurs futures des prédicats en fonction de leurs valeurs présentes. Nous pouvons, par exemple, avoir:

$$\mapsto \eta_k(x_i, t_{n+1}) = 2\eta_k(x_i, t_n) \sqrt{\eta_l(x_j, t_n)}$$

Selon cette règle particulière, en admettant que $\eta_k(x_i)$ soit égal à 2 et que $\eta_l(x_j)$ soit égal à 4 dans l'itération t_n , $\eta_k(x_i)$ vaudra 8 dans t_{n+1} c'est-à-dire, dans l'itération suivante.

⁵ Notons qu'en absence d'autres indications, une règle de transition stochastique sous-entend toujours que, avec une probabilité de $1-\alpha$, l'état de x_i demeurera inchangé dans l'itération suivante. Ne le sous-entendrait-elle pas, l'état de x_i au moment t_{n+1} serait potentiellement indéterminé.

Pour distinguer les règles inconditionnelles des règles conditionnelles, nous employons, comme il est possible de voir, une flèche partant d'un trait vertical, « \mapsto » signalant l'absence de condition du côté gauche.

Ces catégories de règles de transition établies, revenons à présent à la fonction de transition elle-même. Comme nous l'avons évoqué plus haut, une telle fonction peut contenir un nombre illimité de règles, à condition que celles-ci soient toutes *compatibles* entre elles. Une **incompatibilité** surgit en effet chaque fois que deux ou plusieurs états différents sont, ou peuvent être donnés pour le même lieu en un même instant. Prenons par exemple les règles suivantes:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &:= (\eta_1(x_i, t_j) = 7) \rightarrow (\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 1) \\ \varphi_2 &:= (\eta_1(x_i, t_j) = 7) \rightarrow (\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 2) \\ \varphi_3 &:= (\eta_1(x_k, t_j) = 2) \rightarrow (\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 3) \\ \varphi_4 &:= \mapsto \eta_1(x_i, t_{j+1}) = (11 - (\eta_1(x_k, t_j)))^3 \\ \varphi_5 &:= (\eta_1(x_k, t_j) = 7) \xrightarrow{65} (\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 4) \\ \varphi_6 &:= (\eta_1(x_k, t_j) = 7) \xrightarrow{67} (\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 5)\end{aligned}$$

Parmi ces règles, φ_1 et φ_2 sont incompatibles parce que, au cas où $\eta_1(x_i, t_j) = 7$, la valeur de $\eta_1(x_i, t_{j+1})$ est *à la fois* 1 et 2.

Il existe de même une incompatibilité entre φ_1 et φ_3 , car il n'y a aucune contradiction entre leurs prémisses respectives. Rien, effet, n'empêche que $\eta_1(x_i, t_j)$ soit égal à 7, en même temps que $\eta_1(x_k, t_j)$ est égal à 3. Si, toutefois, ces deux cas se réalisent simultanément, nous aurons, pour conséquence, $(\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 1) \wedge (\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 3)$, c'est-à-dire, la valeur de $\eta_1(x_k, t_j)$ serait *à la fois* 2 et 3.

Un cas d'incompatibilité évident survient également entre φ_2 et φ_4 , vu qu'en aucun cas $11 - 7^3$ ne peut être égal à 2. D'un autre côté, φ_3 et φ_4 sont compatibles, car $11 - 2^3 = 3$. φ_3 , néanmoins, apparaît en présence de φ_4 comme règle parfaitement superflue.

Dans un cas stochastique, également, des incompatibilités peuvent surgir. Ainsi φ_5 et φ_6 sont des règles incompatibles car elles donnent pour une même prémisses des probabilités de transition qui se somment à plus de 100%. En effet, si φ_5 et φ_6 coexistaient, le cas conjoint $(\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 4) \vee (\eta_1(x_i, t_{j+1}) = 5)$ aurait une probabilité de survenir absurde de 120%.

Hormis ces contraintes logiques, la définition de la fonction de transition est libre; tout autre choix de règles de transition dépendra de leur adéquation au phénomène observé, de même que d'un désir d'optimisation⁶. Une seule et même fonction de transition peut ainsi contenir des règles tout à fait diverses du point de vue des catégories établies plus haut. Rien n'empêche non plus chaque règle individuelle d'entrer dans plusieurs catégories à la fois – telle règle sera à la fois historique, conditionnelle et déterministe et une autre règle faisant partie d'une même fonction de transition sera à la fois « géographique », stochastique et multivariée. Ce large éventail de possibilités rend adéquatement compte du fait qu'en réalité, toutes les formes de détermination évoquées ci haut sont d'habitude coexistantes dans une grande majorité des phénomènes.

⁶ En effet, étant donné que la fonction de transition sera généralement simulée à l'aide d'un computer, on évitera de définir des fonctions superflues – telles que φ_3 en présence de φ_4 – qui ne représentent qu'une surcharge inutile de masse de calcul.

La question qui se pose cependant à présent est de savoir en quoi les éléments d'un AC définis jusqu'ici s'inscrivent dans un espace. La géographie humaine, en effet, étudie les phénomènes humains *en tant que* spatiaux. Pourtant, nous conviendrons qu'aucun des éléments donnés jusqu'à présent n'a besoin d'un espace pour exister. Consistant en un ensemble d'entités abstraites dont les valeurs de prédicats s'influencent mutuellement dans un processus régi par une fonction de transition – tout aussi abstraite – un AC *ne présente pas* d'emblée un « caractère explicitement spatial »⁷. Sa spatialité, s'il y en a, relève du même espace que celui de LEIBNIZ, consistant uniquement en une classe de relations existantes entre un ensemble de monades⁸.

Le caractère proprement « spatial », tel qu'on l'entend d'habitude en géographie, n'est qu'acquis, dans une mise en forme, dans une représentation créée par l'observateur du modèle. Le caractère spatial des AC ne provient ainsi pas d'eux-mêmes mais d'une façon – éminemment géographique – de saisir leurs fonctions de transition.

Avant de tenter d'expliquer le *pourquoi* de cette mise en forme spatiale d'un AC, voyons son *comment*. Celui-ci commence, à notre avis, par la définition de ce que nous avons déjà, à deux reprises, évoqué comme le « voisinage » d'un lieu.

Nous dirons que *deux lieux sont dits voisins s'il existe une fonction de transition déterminant l'influence directe de l'un d'entre eux sur l'autre, à n'importe quel moment possible du développement du système*. Le voisinage $\Psi(x_i)$ d'un lieu est ainsi à comprendre comme un ensemble de lieux pouvant *potentiellement* entrer en interaction avec x_i . Potentiellement, dans le sens où ces interactions peuvent intervenir à n'importe quel moment de la simulation du modèle cellulaire. Parce qu'il demeure ainsi le même – dans sa potentialité – en tout moment d'une simulation, nous disons ce voisinage « stationnaire ».

Au voisinage ainsi conçu, nous donnerons une expression formelle, en introduisant une **fonction de voisinage** Ψ , définie de la manière suivante:

$\Psi(x_i)$ renvoie l'ensemble des lieux voisins de $x_i \in X$.

$\Psi(x_i) \subseteq X$

$\Psi(x_i, x_j) = \{\Psi(x_i) \cup \Psi(x_j)\}$

$\Psi^n(x_i)$ renvoie le voisinage de x_i de degré n . À titre d'exemple, $\Psi^2(x_i) = \Psi(\Psi(x_i))$, c'est-à-dire, $\Psi^2(x_i)$ représente l'ensemble des « voisines des voisines » de x_i .

$\Psi^0(x_i)$ renvoie x_i . $\Psi^0(x_i) \in \Psi(x_i)$.

$\Psi^*(x_i)$ renvoie $\Psi(x_i) \setminus \Psi^0(x_i)$, c'est-à-dire, l'ensemble des lieux voisins de (x_i) , avec l'exception de (x_i) elle-même.

$|\Psi(x_i)|$ renvoie le nombre de lieux voisins de x_i .

Comme il découle de sa définition, le **voisinage** $\Psi(x_i)$ est entièrement déterminé par la fonction de transition et par l'ensemble des lieux que celle-ci met – ou ne met pas – en lien l'un avec l'autre; formellement: $\Psi = f(\Phi, X)$.

⁷ COCU, CARUSO [2002], 3.

⁸ LEIBNIZ [1714] cité par ESFELD [2002], 22. Une vue relationnelle de l'espace est également avancée dans une optique géographique par O'SULLIVAN [2004], 284. Notons, également que LEIBNIZ [1714], §18 désigne expressément comme « automates » les relata de ces relations: « On pourrait donner le nom d'Entéléchies à toutes les substances simples, ou Monades créées, car elles ont en elles une certaine perfection (ἔχουσι τὸ ἐντελές), il y a une suffisance (ἀυτάρκεια) qui les rend sources de leurs actions internes et pour ainsi dire des Automates incorporels ».

Il existe, à présent, plusieurs façons de représenter un tel voisinage. La première – et certainement la moins claire – peut être observée dans la Figure 6. Dans cette figure, les lieux sont arrangés de manière quelconque le long d'une ligne, avec leurs relations de voisinage inscrites à l'aide de flèches. Une autre manière, bien plus *compréhensible* de représenter ces relations est visible dans la Figure 7. Ici, dans un geste proprement géographique, nous avons doté les lieux d'une topologie – d'une structure spatiale qui rend les relations apparentes. Dans la Figure 7d, parachevant ce geste, le voisinage est carrément résumé en une contiguïté spatiale.

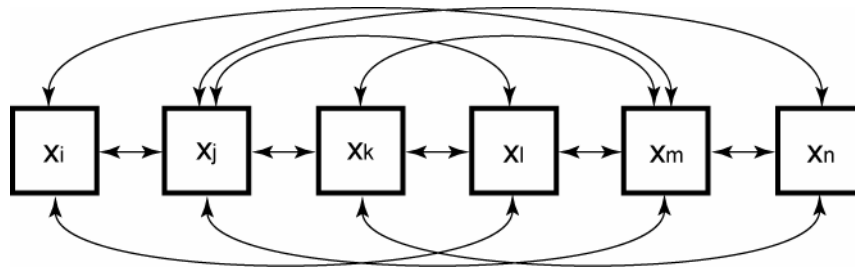


Figure 6: Exemple: Relations de voisinage entre six lieux formant un AC.

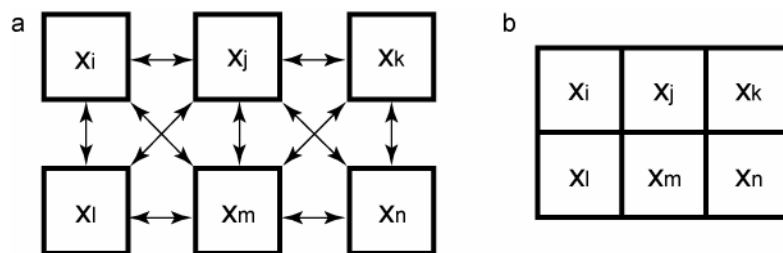


Figure 7: Relations de voisinage de la Figure 6 représentées en termes de contiguïté spatiale: (a) lieux arrangés en deux dimensions avec relations explicitement inscrites; (b) lieux contigus avec relations implicites.

La notation proposée pour désigner les lieux (*cf.* 6.1) peut désormais être adaptée à cette nouvelle représentation. Si l'espace représentant au mieux les relations entre les lieux s'avère être un espace bidimensionnel, ainsi que cela est le cas dans le présent exemple, nous désignerons ceux-ci par un couple de *coordonnées* (X, Y) (Figure 8); dans un espace tridimensionnel nous utiliserons (X, Y, Z) etc. D'un tel point de vue spatial, ni (X, Y) , ni (X, Y, Z) ne seront désormais plus de simples *ensembles* mais des *matrices*. Une expression comme (x_1, y_2) ne désigne par exemple plus un quelconque élément de (X, Y) mais un lieu localisé à un emplacement précis au sein de ce que nous nommerons un **espace cellulaire** – emplacement qui renseigne sur sa relation de voisinage avec d'autres lieux⁹.

⁹ Ainsi que nous le verrons ultérieurement (7.1), cette re-sémantisation de notre notation s'appliquera désormais également à l'espace unidimensionnel, noté par X .

x_1, y_1	x_1, y_2	x_1, y_3
x_2, y_1	x_2, y_2	x_2, y_3

Figure 8: Les lieux renommés pour refléter leur emplacement dans l'espace bidimensionnel. Comme dans la Figure 7.b, les relations de voisinage peuvent ici être lues dans la forme de l'espace cellulaire, avec l'avantage d'être également aisément déductibles des dénominations des lieux eux-mêmes.

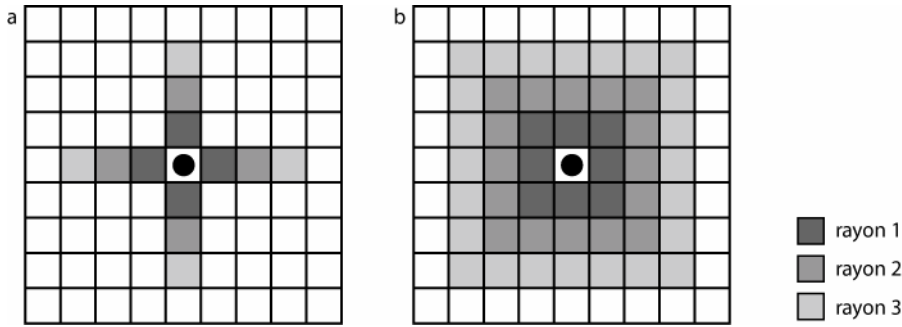


Figure 9: Voisinage (a) de VON NEUMANN et (b) de MOORE¹⁰, au rayon 1, 2 et 3.

Ce n'est qu'au sein de l'espace cellulaire ainsi établi et mappé par un système de coordonnées que peuvent être inscrits des voisinages classiquement évoqués dans le contexte de la modélisation cellulaire. Nous avons à l'esprit surtout le « voisinage de VON NEUMANN », aussi appelé « voisinage de la tour »; et le « voisinage de MOORE », aussi appelé « voisinage de la reine ». Dans un espace bidimensionnel, par exemple, de tels voisinages peuvent être exprimés de la manière suivante:

Pour un **voisinage de VON NEUMANN**, nous avons:

$$((i, j) \in (X, Y))(\Psi^*(x_i, y_j) := \{(x_{i+1}, y_j), (x_i, y_{j-1}), (x_i, y_{j+1}), (x_{i-1}, y_j)\})$$

Pour un **voisinage de MOORE**, nous avons::

$$((i, j) \in (X, Y))(\Psi^*(x_i, y_j) := \{(x_{i-1}, y_{j+1}), (x_i, y_{j+1}), (x_{i+1}, y_{j+1}), (x_{i-1}, y_j), (x_{i+1}, y_j), (x_{i-1}, y_{j-1}), (x_i, y_{j-1}), (x_{i+1}, y_{j-1})\})$$

Comme il est possible de vérifier, dans le voisinage bidimensionnel de von Neumann, seule un indice – i ou j, correspondant ici à des coordonnées spatiales – peut être incrémenté à la fois, alors que dans le voisinage de Moore, il est possible d'incrémenter les deux indices de manière indépendante. La valeur de l'incrémentation peut d'ailleurs varier. On désignera cette valeur comme **rayon de voisinage**. La Figure

¹⁰ Notons que, au vu de cette représentation de l'espace recouvert par le voisinage de Moore, le terme « voisinage de la reine », également utilisé, semble quelque peu inapproprié.

9 montre des voisinages de von Neumann et de Moore de rayon 1, 2 et 3. Nous noterons que ce rayon pourra être en géographie pour représenter une intensité d'interaction. Dans une telle interprétation, les lieux inclus uniquement dans le rayon ≥ 3 du voisinage d'un lieu donné auront moins d'influence sur ses états que les lieux inclus dans un rayon ≥ 2 .

Afin de pouvoir étendre la définition de ces deux voisinages à d'autres dimensions et découpages spatiaux que ceux de l'espace bidimensionnel régulier, nous interprétons le premier de ceux-ci comme équivalent à une *contiguïté par arrête commune*, l'autre comme équivalent à une *contiguïté par arrête commune ou par sommet commun*.

Ce qui est important de noter ici est que de telles représentations d'un AC en termes spatiaux – dans un espace où un rayon de voisinage peut éventuellement être formulé – sont lourdement chargées de *sens*. En relevant, en effet, une forme spatiale de la fonction de transition – c'est-à-dire, en formulant un espace de telle ou telle manière – le géographe s'exprime *toujours* sur les rapports de détermination entre les entités qu'il observe. L'espace géographique apparaît ainsi comme toujours *signifiant*: il relève d'un *sens* que le géographe donne à la réalité.

Ce sens, demandant une attention particulière que nous lui accorderons encore dans les chapitres ultérieurs, constitue précisément le *pourquoi* de la spatialisation d'un AC. En l'établissant, la géographie accomplit en effet ce que d'autres procédés cognitifs individuels ou collectifs accomplissent d'autres manières: elle donne sa valeur sémantique à un ensemble de faits objectivés. Elle donne, à ces faits – représentés ici par un ensemble de lieux et de rapports de détermination entre ces derniers – une structure.

Cette structure peut prendre diverses formes dont la construction remonte toujours à un désir¹¹ – et à une nécessité – d'articuler des données sensibles¹² (visuelles, tactiles, kinesthésiques etc.) en un *monde*; un monde souvent conçu en termes d'un système d'entités inter-reliées, d'une *protogéométrie* qui ne devient géométrie qu'au sein d'un système symbolique, porté par la société. Nous avons ainsi les mots du langage naturel, articulés dans une structure grammaticale; celle des personnages et objets de mythes, liés par leurs sentiments réciproques et leurs vécus communs; celle des sefirot, articulés au sein de l'arbre cabalistique¹³... La forme particulière que cette structure adopte dans une vision géographique est celle que nous appelons « espace ». Et cet espace n'est autre que celui de la *carte*, dans la définition la plus générale de cet objet.

Par ces observations, nous voulons avertir surtout contre une faute fréquemment commise, qui consiste à procéder dans le sens inverse d'une formulation de l'espace à partir d'une structure de relations entre des entités données. Très fréquemment en effet, partant d'un espace préconçu, on déduit une fonction de transition. Ce qu'une telle démarche inverse a de parfaitement inadéquat, au vu de ce que nous venons d'exposer, est qu'elle implique que l'on présuppose à la réalité un sens d'emblée donné. Chaque espace étant nécessairement chargé de sens, le géographe-modélisateur affirmerait ainsi une signification apriorique du monde!

¹¹ Ce désir existentiel est porté aussi bien par des individus, que par des sociétés, que par des sciences particulières, comme la géographie.

¹² cf. POINCARÉ [1895].

¹³ Voir MAGNANI [2001], chapitre 1, pp. 1-26: « At the Origins of Geometrical Knowledge » et chapitre 7, pp. 175-210: « Geometry and cognition ».

À maintes occasions encore, nous aurons à revenir sur cet important enjeu. Avant d'y revenir consacrons cependant un dernier chapitre à une classe d'éléments particuliers des AC, nommés « agents ».

6.4 Les agents, un élément supplémentaire?

Dans ce travail dédié aux AC devons-nous et pouvons-nous seulement accorder notre attention aux modèles basés agents? BENENSON et TORRENS [2004], en tout cas, suggèrent qu'une combinaison des deux approches est indispensable dans le cadre de la recherche en géographie humaine, et nous nous joignons à leur suggestion. Afin de pouvoir l'argumenter, néanmoins, nous voulons examiner en quoi les agents peuvent *et* ne peuvent pas être identifiés aux lieux, et en quoi ce caractère ambivalent nous permet de les traiter dans le cadre des AC, tout en rendant compte de leur particularité par rapport aux lieux.

Dans le contexte cellulaire, la notion d'**agent** peut avoir deux significations distinctes. Premièrement, étant donné que leurs états ont un impact sur l'évolution du modèle, les lieux agissent: ils sont les agents d'un système complexe. La notion d'agent est alors synonyme de lieu. Mais le terme « agent » peut également se référer à des entités mobiles, c'est-à-dire, à des entités dotées de la capacité de se déplacer de lieu en lieu; n'étant pas liés à l'espace, leur emplacement peut changer, alors qu'ils conservent leur identité. Pour notre part, c'est cette deuxième signification que nous retiendrons lorsque nous parlerons d'agent.

La question, dans ce cas, est de savoir si ce ou ceux que nous appelons agents consistent nécessairement en un substrat détaché de la matrice cellulaire où s'ils peuvent être réduits à de l'information pure, c'est-à-dire, à de simples prédicats de lieux, pris en compte dans une fonction de transition. Cette question fait directement écho à la question philosophique de la *dualité de l'espace et de la matière*. Il est en effet bon pour nous de savoir que certains penseurs considèrent la matière comme simple propriété de l'espace-temps. Parmi eux, SPINOZA, pour qui la matière est un prédicat localisé de l'omniprésent sujet Dieu¹⁴, ou, plus actuellement, J. A. WHEELER, pour qui toute matière n'était, jusqu'au début des années 1970', qu'une propriété géométrique de l'espace-temps courbe¹⁵. Les AC ont eux-mêmes été employés dans l'effort d'éclaircissement de cette question avec, par exemple, les travaux notables de FREDKIN et de TOFFOLI¹⁶. Notons que TOFFOLI argumente par ailleurs en faveur de la thèse d'un monde fondamentalement discret – une argumentation dont le géographe pourrait déduire la supériorité du modèle raster au modèle vectoriel de l'espace...

La question géographique de la réductibilité des agents aux propriétés de lieux se distingue néanmoins de la question métaphysique de la réductibilité de la matière à l'espace. L'épistémologie géographique cherche uniquement à savoir s'il est nécessaire d'ajouter un élément à l'ontologie intrinsèque des AC pour pouvoir rendre compte d'entités géographiques mobiles qu'il lui arrive de traiter. À notre avis, une telle adjonction n'est pas nécessaire dans le sens strictement mathématique, tout en étant

¹⁴ SPINOZA [1677], Propositio XV.

¹⁵ Voir surtout GRAVES [1979]. Notons que déjà en 1972, WHEELER rejetait la géométrodynamique – sa propre théorie de réductibilité de la matière à l'espace-temps – car elle s'est avérée incapable de prendre en compte certains phénomènes observables, tel des singularités ou des fermions.

¹⁶ Voir surtout TOFFOLI [1994] et HEDRICH [2002].

pertinente, voir nécessaire, du point de vue de l'expressivité du modèle et de la conservation de sa nature géographique. Voyons cependant d'abord en quoi les agents peuvent être considérés comme mathématiquement réductibles à des prédicats de lieux.

Imaginons le cas simple d'un déplacement quelconque. Plusieurs cas de ce type se trouvent parmi les exemples traditionnels des AC. Dans un **Jeu de la Vie**, par exemple, il est possible d'observer des « glisseurs » dont le déplacement diagonal au travers de l'espace cellulaire ne tient qu'en changements d'états transmis de lieu en lieu¹⁷. L'entité « glisseur » a néanmoins cela de particulier qu'elle recouvre plusieurs lieux. Pour notre part, nous voulons choisir un exemple où l'apparent agent n'occupe que la place d'un seul lieu. Un tel cas se présente sous la forme de la célèbre **Fourmi de LANGTON** (Figure 10).

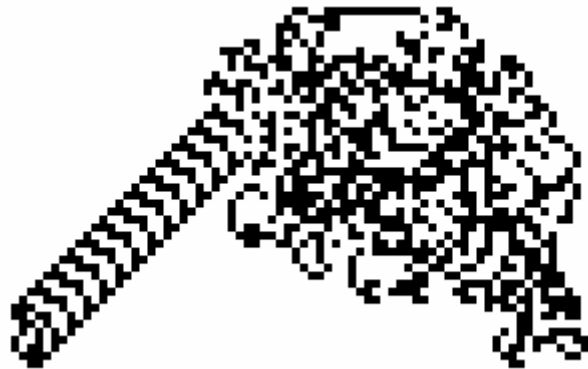


Figure 10: Les traces d'une Fourmi de LANGTON, au bout de la 11331^e itération. Le point de départ fut ce qu'est à présent le centre de l'amas de traces, le lieu possédant une direction se trouve en ce moment à l'extrême Sud-Ouest de l'illustration. (Généré avec NETLOGO¹⁸)

La fourmi de LANGTON évolue au sein d'un automate déterministe bidimensionnel, c'est-à-dire, au sein d'un espace où chaque lieu peut être localisé à l'aide d'une paire de coordonnées (x_i, y_j) et où, à chaque fois, ces coordonnées renseignent sur le voisinage du lieu donné (cf. 6.3). L'état de tout lieu d'un AC modélisant une Fourmi de LANGTON est défini comme suit:

$$\begin{aligned} H &= \{Direction, Couleur\} \\ Direction &= \{aucune, ouest, est, nord, sud\} \\ Couleur &= \{blanc, noir\} \end{aligned}$$

Lorsque le lieu possède une direction – c'est-à-dire, lorsqu'il possède la propriété « *Direction* \neq aucune » – nous disons qu'une fourmi s'y trouve. La dynamique de l'automate peut alors être formulée du point de vue de cette fourmi:

¹⁷ Voir, p. ex., DENNETT [1991, 1995].

¹⁸ Cette version du modèle a été programmée par P. GEER et rendue disponible en ligne sur <http://mainline.brynmawr.edu/~pgeer/Netlogo/Langton.html>

Φ = *La fourmi se déplace à chaque itération; elle change à chaque fois la couleur du lieu qu'elle quitte. Si le lieu d'arrivée est noir, elle s'oriente de 90° à gauche; si le lieu d'arrivée est blanc, elle s'oriente de 90° à droite.*

Tel n'est cependant qu'un point de vue. Lorsque la fonction de transition de la fourmi de LANGTON est développée de manière formelle, il apparaît qu'aucune fourmi ne « se déplace ». L'état de tout lieu co-détermine simplement l'état de tous ses voisins, y inclus lui-même. Lorsque, par exemple, un lieu se trouve dans l'état $H = \{\text{ouest, noir}\}$ et que la couleur du voisin à l'ouest est « blanc », ce voisin adoptera l'état $H = \{\text{nord, blanc}\}$ à la prochaine itération; le lieu lui-même adoptera l'état $H = \{\text{aucune, blanc}\}$ et tous les autres lieux de l'automate demeureront inchangés. Nous voyons qu'aucun agent détaché du substrat des lieux eux-mêmes n'est nécessaire pour rendre compte de ce mouvement.

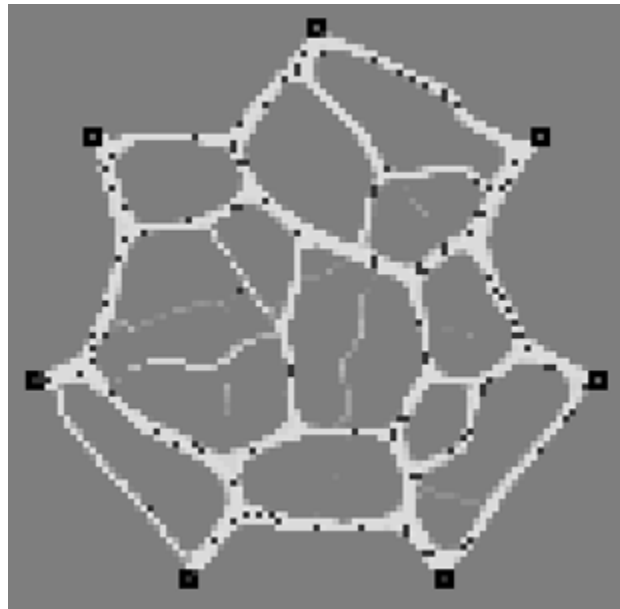


Figure 11: Émergence de chemins dans le gazon entre sept bâtiments arrangés de manière concentrique. Bien que le modèle pourrait être décrit en termes de propriétés de lieux, il est basé agents. Cela raccourcit considérablement son code de programmation et donne au modèle une signification difficilement exprimable dans les seuls termes de propriétés de lieux. (Simulation du modèle STARLOGO de KITSOPOULOS [2004])

Le modèle de LANGTON, dira-t-on, n'est cependant applicable qu'à un mouvement sans but. En effet, bien qu'il se rapproche peut-être raisonnablement du mouvement brownien d'une particule, il ne rend en rien compte du comportement d'un agent humain qui ne se déplace pas par inertie mais parce qu'il aimerait aller à (x_i, y_j) . Une excellente illustration d'un tel déplacement intentionnel – que, parce qu'il vise une destination particulière, nous appellerons téléique¹⁹ – est montrée par exemple dans le modèle stochastique *basé agents* de KITSOPOULOS [2004] (Figure 11).

¹⁹ De τέλος (achèvement, accomplissement, but, fin).

Est-il cependant possible de se passer de la description d'un tel déplacement en termes d'états de lieux, c'est-à-dire, en dehors d'une formulation en termes d'agents? Pour le vérifier, prenons le cas simple d'une propriété d'un lieu (x_i, y_j) , dénotant la présence virtuelle d'un agent, devant se déplacer de lieu en lieu jusqu'à (x_k, y_l) .

Rappelons d'abord que nous nous situons dans un système de coordonnées (X, Y) , d'emblée présumé comme espace de la Fourmi de Langton. Notons, d'autre part, que se diriger vers (x_k, y_l) revient à réduire la distance qui en sépare, c'est-à-dire, de parvenir à une situation où $(i - k) + (j - l) = 0$.

Au vu de ces deux considérations, et en admettant que l'origine du système de coordonnées se trouve dans l'extrême Sud-Ouest de l'automate, le modèle du déplacement téléique peut alors se présenter de la manière suivante:

$H = \{Direction, Destination\}$

$Direction = \{aucune, ouest, est, nord, sud\}$

$Destination = \{vrai, faux, atteinte\}$

$\Phi = \text{À la coordonnée du lieu dirigé est soustraite la coordonnée du lieu possédant la propriété « Destination = vrai »; cela renvoie un résultat de type \{m, n\}. Si } m > 0, \text{ la direction du lieu devient « ouest », si } m < 0, \text{ « est ». Si } m = 0 \text{ alors } n \text{ est considéré: si } n > 0, \text{ la direction du lieu devient « nord », si } n < 0, \text{ « sud ». Si } (m = 0) \wedge (n = 0), \text{ le lieu se met dans l'état } H = \{aucune, atteinte\}.$

Nous voyons qu'ici, également, aucun agent ne dut être introduit. Rien ne s'oppose donc à considérer même le déplacement téléique comme indépendant d'un substrat distinct des lieux eux-mêmes.²⁰

Plus d'exemples encore peuvent cependant être imaginés; de plus en plus complexes, introduisant de plus en plus d'éléments géographiques. Nous pouvons considérer, par exemple, des discontinuités spatiales infranchissables séparant le lieu de départ du lieu de destination. Un itinéraire doit alors être prévu et représenté, probablement par un système de marquage de route, possible grâce à de nouveaux états encore. Tout cela peut toujours et encore être représenté en termes de lieux, d'états et d'une fonction de transition appropriée. Il est à supposer qu'en dernière conséquence, chaque nouvel élément géographique ainsi introduit puisse être réduit de la même façon. Une preuve mathématique de cette hypothèse reste à être formulée mais le fait que le modèle cellulaire – même s'il *représente* parfois des agents – est implémentable dans un computer, qu'il est donc *calculable*, dans le sens de la calculabilité par Machine de

²⁰ Remarquons que le souci de rendre compte de ce type de déplacement ne se pose que rarement en ces termes dans le cadre de la géographie humaine. À des échelles plus petites que celle du cheminement individuel – c'est-à-dire, à des échelles considérées plus fréquemment par la géographie – le chemin exact emprunté par un agent importe peu. Entre deux villes, ou deux pays, le géographe établira un solde migratoire représenté par des fluctuations de la valeur de la propriété « population » de chaque lieu. Des diminutions d'un côté et augmentations de l'autre de cette valeur rendent compte de déplacements effectifs sans faire intervenir un seul agent (cf. 7.3).

D'autre part, même à l'échelle du déplacement individuel les agents géographiques suivent souvent des voies de communication prédéfinies. Ces voies peuvent être prétracées dans le modèle, en dotant par exemple une série contiguë de lieux d'une propriété binaire « route ». Chacun de ces lieux peut également être doté d'un ensemble de propriétés de type $\{distance_1 = 25, distance_2 = 3, distance_3 = 10, \dots\}$, indiquant à chaque fois la distance le séparant de diverses destinations. Il devient alors possible d'adopter une méthode analogue à celle du modèle du déplacement téléique, rapprochant peu à peu l'agent *virtuel*, modélisé par la propriété « Direction \neq aucune », de la destination souhaitée.

TURING²¹, et que la Machine de TURING elle-même soit simulable par un AC du type Jeux de la Vie dénué d'agents, donne à notre hypothèse un fort soutien. Pour la rejeter, un AC incalculable devrait être conçu.

Mais que signifie la possibilité ultime de cette réduction pour la géographie? Car bien qu'importante, la question de la réductibilité mathématique, au même titre que celle de la réductibilité métaphysique, aspire à un type d'abstraction que la géographie ne recherche point. Le domaine ontologique de la géographie se situe à une autre échelle. Au sein de cette échelle régit une nécessité incontournable de parler de perception, de projets, de besoins, d'intentions dont résultent aussi bien des déplacements de lieu en lieu que les modifications de la teneur des lieux eux-mêmes. Parce que la géographie humaine considère ces faits intentionnels – des faits éminemment associés à des agents vivants, distincts d'un substrat « naturel » inanimé – elle se voit forcée à concevoir des agents incarnant ces intentions. Pour la géographie, les représentations d'agents par le moyen de propriétés de lieux demeurent donc agents, malgré leur réductibilité ultime.

C'est également du point de vue géographique que cette réductibilité elle-même peut être discutée. Car si, du point de vue mathématique, les éléments réduits sont intégralement remplacés par d'autres, le point de vue géographique fait entrevoir la perte d'éléments indispensables à sa recherche. Et c'est cette perte qui rend la réduction discutable. Nous ne voulons évidemment pas, par cette considération, mettre en cause le point de vue mathématique mais simplement démarquer ce en quoi l'orientation épistémique de la géographie s'en distingue. Alors que, dans la mathématique, les agents s'avèrent comme ultimement superflus, ils ne le sont pas au sein de la géographie humaine.

Dans cette dernière, les agents existent en fait même lorsqu'ils ne sont point représentés, c'est-à-dire, même si le modèle utilisé en est en apparence dépourvu. En effet, lorsqu'il modélise l'occupation du sol d'une ville, la valeur foncière des terrains d'un canton, la localisation des ressources primaires d'un pays, le géographe ne peut qu'impliquer la présence d'agents *pour qui* ces bâtiments sont bâtiments, ces valeurs valeurs, ces ressources ressources. Chaque état cellulaire est l'expression d'une décision humaine et « afin de comprendre un processus social, on doit déceler la situation d'un preneur de décision, qui inclut de l'information inconsistante ou incomplète, des valeurs et prises de partie, des motifs à court terme et des croyances générales »²².

Nous voyons ainsi que, même si explicitement absents de tel ou tel modèle cellulaire, les agents sont y sont toujours nécessairement présents, du moins implicitement, afin de garantir sa géographicit .

²¹ cf. note 17, p. 16.

²² LEY [1979]: « To understand social process one must encounter the situation of the decision-maker, which includes incomplete and inconsistent information, values and partisan attitudes, short-term motives and long-range beliefs ».

7 Une typologie spatiale des automates cellulaires

Nous l'avons vu dans le chapitre précédent, ce que nous appelons « espace cellulaire » émane de deux éléments: d'une classe d'*entités géographiques* et d'une classe de *relations* entre ces entités. Nous avons, d'un côté, les lieux et, de l'autre, une fonction de transition établissant des relations entre ces derniers. Nous avons également vu, que la *forme* de ces relations peut être exprimée en termes d'une fonction Ψ , définie en fonction de Φ et de X , et donnant pour chaque lieu l'ensemble de ses voisins.

Afin, à présent, de pouvoir *étudier et comprendre* les relations entre ces lieux – de la manière géographique exposée dans le chapitre 6.3, nous devons trouver des espaces dans lesquels ces relations peuvent être exprimées en termes de proximités spatiales. Nous devons trouver des espaces qui par leur seule forme, nous renseignent sur le voisinage de chaque lieu; des espaces qui, pour ainsi dire, incarnent Ψ . Comme nous l'avons vu, de notre capacité de formuler de tels espaces dépendra surtout notre aptitude à interpréter, en termes géographiques, les fonctions de transition régissant certains AC.

Alors que nous n'aborderons que plus loin (9) des moyens de *construire* et de *représenter* de tels espaces, nous voulons les examiner ici, en tant que possibles. Nous voulons, en clair, présenter les divers espaces plus ou moins connus dans lesquels *peuvent* fonctionner des AC et montrer en quoi ces espaces s'articulent « d'emblée » à ceux de la géographie humaine. C'est du point de vue de la dimensionnalité et du découpage géographique de ces espaces que nous voulons établir, ici, ce qui peut être conçu comme une typologie géographique des AC.

7.1 Les espaces unidimensionnels

Laissant de côté le point sans dimensions, capable de tenir seulement un lieu et ne présentant par conséquent pas d'intérêt pour une étude de processus dynamiques complexes, commençons par \mathbb{R}^1 , l'espace euclidien unidimensionnel. L'unique objet pouvant exister dans un tel espace est une ligne. Pour le géographe, cela ouvre déjà un monde possible de métaphores: la ligne fait partie des trois objets constitutifs de la cartographie classique; elle peut représenter toute une classe d'objets, allant de la route jusqu'à un groupe de personnes alignées dans une file d'attente...

Au sein d'un AC, \mathbb{R}^1 ne peut qu'être *approximé* par \mathbb{Z}^1 , l'espace unidimensionnel *discret*. C'est grâce à cette approximation²³, permettant de concevoir des *lignes discrètes*, que les AC unidimensionnels permettent de modéliser les objets géographiques conçus comme unidimensionnels (Figure 12).

La ligne discrète peut, d'autre part, constituer une réduction utile pour l'étude de certains phénomènes possédant plus de dimensions même dans une objectivation géographique. C'est ainsi que SCHELLING [1969] présente son premier modèle dynamique de ségrégation spatiale sous la forme d'un AC unidimensionnel.

²³ La question de *savoir* s'il s'agit vraiment là d'une approximation ou si, au contraire, un espace continu n'est qu'abstraction approximative d'un espace fondamentalement discret est discutée plus en détail chez TOFFOLI [1994].

Figure 12: AC unidimensionnel pour l'étude de la formation d'embouteillages sur une autoroute. Les agents – voitures – se déplacent de gauche à droite. (Généré avec NETLOGO)

À notre avis, l'avantage principal des AC de ce type réside toutefois, dans les représentations spatiotemporelles qu'ils permettent de produire. En effet, la représentation statique du phénomène simulé occupant uniquement une dimension de l'espace d'un écran ou d'une feuille de papier, le géographe dispose de l'autre dimension pour représenter son *évolution*, observable dans une simulation dynamique. Il peut ainsi étudier la structure spatiotemporelle du déploiement des activités humaines. C'est à HÄGERSTRAND [1970]²⁴ (Figure 13) que la géographie humaine doit les premiers diagrammes de ce type.

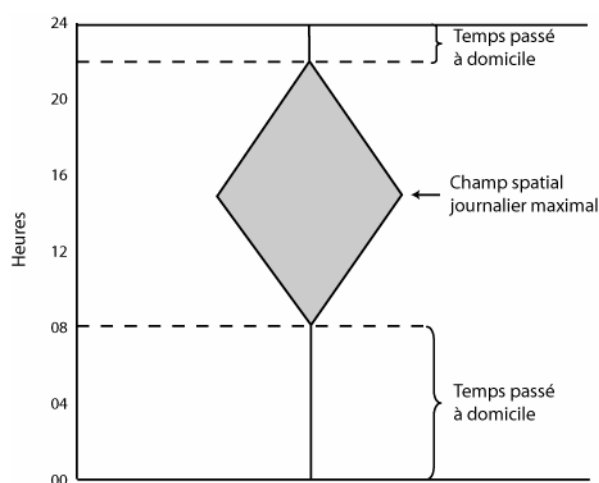


Figure 13: Le prisme d'activité d'un individu. L'ordonnée du graphique représente l'espace, l'abscisse le temps. (Adapté de HÄGERSTRAND [1970])

En dehors des contraintes d'interprétabilité en termes de phénomènes de la géographie humaine, il est bien sûr possible d'imaginer un nombre infini de structures spatiotemporelles produites par la simulation d'AC unidimensionnels divers. C'est dans un ouvrage synthétisant ses recherches ainsi que les résultats – parfois hélas quelque peu sous-croisés – des travaux de ses nombreux prédécesseurs que WOLFRAM [2001] propose une classification efficace des plus élémentaires de ces structures. Il arrive à cela en classifiant les fonctions de transition ayant mené à leur génération. Par la compression d'une série de chiffres représentant chacune de ces fonctions, il parvient à assigner à toutes un numéro unique. L'une des structures ainsi classifiées peut être observée dans la Figure 14.

Le plus grand apport de la démarche systématique de WOLFRAM se situe certainement au niveau de l'interrogation mathématique sur la complexité et le chaos (cf. 4). Les

²⁴ Pour ces représentations, HÄGERSTRAND lui-même fut inspiré des travaux du physicien MINKOWSKI à qui l'on doit notamment le célèbre concept du **cône de lumière**.

nombreuses figures générées et clairement désignées s'offrent en effet comme objets concrets de la discussion portant sur la différence entre ces deux types de phénomènes. Elles permettent par exemple de se demander quels paramètres mathématiques permettront de classer les apparemment irrégulières parmi elles comme complexe ou comme chaotique. La systématisation des AC entamée par WOLFRAM permettra peut-être également, à long terme, de contribuer à l'élaboration d'un moyen mathématique de *prédire le type* de développement qu'un AC montrera dans sa simulation à partir de sa seule fonction de transition²⁵.

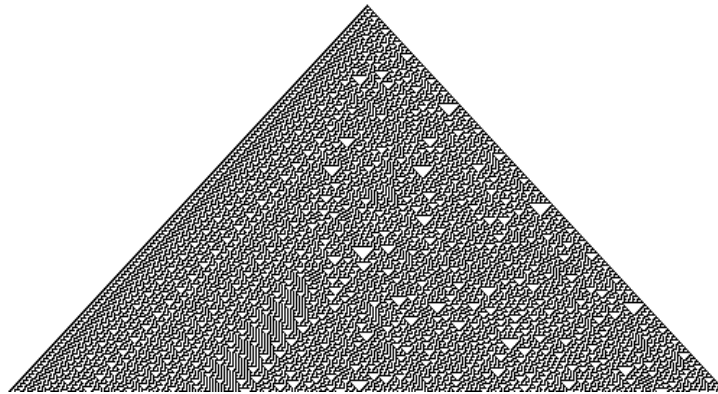
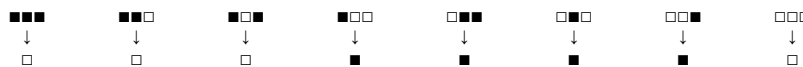


Figure 14: L'évolution dynamique d'un AC unidimensionnel obéissant à la fonction 30:



(Généré avec MATHEMATICA 5)

La recherche portant sur ces questions est aujourd'hui en plein cours et demande une compétence en mathématiques élevée, se situant bien en dehors du champ de compétence géographique. Il est néanmoins dans l'intérêt de la géographie de suivre les résultats cette recherche. Ceux-ci pourront, à notre avis, être d'un grand apport notamment dans le cadre des interrogations du développement durable, l'intérêt duquel étant souvent de savoir quel développement – stable ou instable, chaotique ou cyclique – aura telle ou telle structure sociale à long terme.

7.2 Les espaces bidimensionnels

Parmi tous les espaces géométriques, \mathbb{R}^2 – et son approximation cellulaire \mathbb{Z}^2 – est l'espace le plus fréquemment utilisé aussi bien dans les modèles cellulaires qu'en géographie. La géographie humaine hérite cet espace non seulement d'une cartographie de navigation maritime et de conquêtes territoriales mais également, en grande partie, de l'objectivation cartésienne puis newtonienne d'un espace physique. Cet héritage lui permet d'entretenir un lien avec la géographie physique – lien qui, à son tour, lui permet d'étudier la relation entre les phénomènes de société et les phénomènes minéraux du globe terrestre. C'est, en effet, \mathbb{R}^2 que nous trouverons le

²⁵ cf. FATÈS [2001], 23.

plus analogue à celui de la surface terrestre, et c'est encore par rapport à \mathbb{R}^2 que la géographie peut formuler des relations comme « granite vote à droite, calcaire vote à gauche »²⁶.

Espace omniprésent de la carte, \mathbb{R}^2 s'impose d'autre part d'emblée dans toute représentation imprimable sur feuille ou sur écran. C'est en lui que sont inscrits les espaces de dimension plus basse, c'est sur lui que sont projetés les espaces de dimension plus haute. L'écrasante majorité de toutes les questions de représentabilité de phénomènes géographiques tournent autour de la possibilité de leur inscriptibilité dans cet espace²⁷.

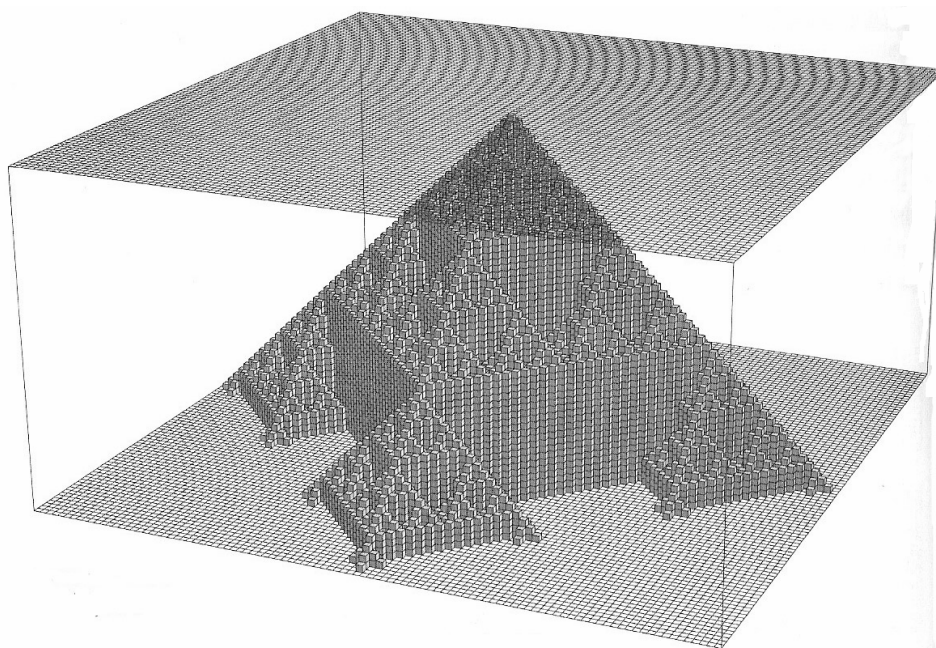


Figure 15: Structure cellulaire spatio-temporelle instanciant la fonction de transition 942. Les couches synchroniques de l'espace – 2D – sont disposées en plans horizontaux, le temps « progresse » verticalement, de haut en bas. (Généré avec MATHEMATICA)

C'est pour toutes ces raisons que nous avons choisi d'indexer dans \mathbb{Z}^2 la majorité de nos exemples d'application des AC en géographie humaine et que nous continuerons à faire usage de cet espace comme de notre espace canonique. Ici, néanmoins, une remarque s'impose, valant aussi bien pour les espaces uni- que bidimensionnels: Il faut noter que le fait de se référer aux lieux d'un AC par des coordonnées cartésiennes dans \mathbb{Z}^2 ne fait pas de l'espace d'un automate un espace *euclidien*. En effet, la forme de l'espace dépendant entièrement de la définition du voisinage des lieux, nous rencontrerons plus bas (7.5) des espaces représentés dans \mathbb{Z}^2 mais montrant des propriétés typiquement non-euclidiennes.

²⁶ Formulation célèbre provenant de SIEGFRIED A. [1913] *Tableau politique de la France de l'Ouest sous la 3^e République*. Paris: Colin.

²⁷ Nous reviendrons en détail à la question de cette inscriptibilité dans le chapitre 9.3.

Notons finalement encore une chose avant de nous pencher sur les espaces de dimension plus haute et sur les espaces irréguliers. De même que les espaces unidimensionnels, les espaces bidimensionnels « laissent libre » une dimension de l'espace euclidien représentable pour... la dimension du temps. Alors que celle-ci se fera par l'ajout d'une deuxième dimension dans le cas des AC unidimensionnels, une troisième s'avère nécessaire dans le cas des AC bidimensionnels, ainsi que nous pouvons l'observer dans la Figure 15.

Au vu de telles figures, se pose une question importante. Il est en effet possible de se demander si les structures spatiotemporelles traçant l'évolution d'un AC ne seraient pas, en fait, des automates particuliers de dimension plus haute. L'exemple de la percolation, montré dans la Figure 3.c (p.25), peut effectivement être vu de ces deux manières à la fois: alors que le front de percolation n'est, en soi, qu'un AC unidimensionnel stochastique, la forme globale, générée par sa progression – dans l'espace et dans le temps à la fois – est une forme bidimensionnelle dont chaque ligne est « simultanément présente » dans une sorte d'univers-bloc. Nous voyons que la question nous ramène de nouveau à la distinction entre le processus et la forme que nous avons abordée dans le chapitre 3. Les différentes dimensions dans lesquelles peuvent être considérés des AC simples participent ainsi à notre compréhension de la fondamentale indistinguabilité entre les paradigmes divergents de l'Être et du Devenir. D'autre part, par rapport à des réflexions plus récentes, l'existence de structures spatiotemporelles analogues à celles que nous venons d'évoquer nous rappelle également qu'il serait trop précipité, pour une géographie dynamique, de considérer, pour sa seule prise en compte du temps, d'avoir rompu avec la pensée du structuralisme.

7.3 Les espaces tri- et n-dimensionnels

Nous entrons à présent dans le domaine de \mathbb{Z}^3 et de \mathbb{Z}^n , espaces discrets tridimensionnels et hyperespaces discrets, à $n > 3$ dimensions. Cette dernière expansion spatiale présente plusieurs avantages et ouvre un nombre de questions intéressantes.

Il y a d'abord, dans \mathbb{Z}^3 , la possibilité déjà évoquée de rendre compte de l'évolution d'un AC bidimensionnel en lui ajoutant une dimension consacrée à l'axe du temps. Cette possibilité parvient en même temps à sa limite car, voudrions nous rendre compte de l'évolution d'un AC à trois dimensions spatiales, l'usage de l'hyperespace s'impose, avec des questions de représentabilité évidentes. Nous y reviendrons d'ailleurs dans le chapitre 9.3.

La signification des dimensions supplémentaires ne se limite toutefois pas au temps. N'importe quelle variable, pour autant qu'elle soit quantitative – ou du moins catégorisable – peut être représentée le long d'un axe. C'est par exemple ainsi, en attribuant un troisième axe spatial à la propriété « altitude », que le géomorphologue peut produire le modèle 3D d'un paysage. En géographie humaine, nous nous intéresserons d'avantage à d'autres variables, comme la population, l'âge ou le revenu moyen, qui peuvent néanmoins être mappées de la même manière.

Dans un espace tri- ou n-dimensionnel ainsi formé, la proximité des lieux cesse de représenter une pure proximité spatiale sur la surface terrestre pour représenter une **proximité thématique** – les lieux sont d'autant plus proches que les valeurs de leurs

prédicats se ressemblent. Une telle proximité, donnée toujours par la métrique euclidienne, peut être établie dans un espace à 4, 5, ... n dimensions. Potentiellement, il est possible de transformer l'ensemble des prédicats d'un lieu en ses coordonnées pour obtenir un **espace des variables** bien connu dans la statistique multivariée. Ce fait, en apparence anodin, projette en avant notre réflexion sur la modélisation d'un phénomène géographique en termes d'un AC. Prenons, pour comprendre la direction que cette réflexion doit prendre, l'exemple d'un lieu (x_i, y_j) , mappé dans un espace bidimensionnel, possédant trois propriétés quantitatives – η_1 , η_2 et η_3 . Nous avons:

$$\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}(x_i, y_j)$$

Considérons à présent que ce même lieu peut tout aussi bien être mappé dans un espace à quatre dimensions, ne conservant que deux prédicats. Nous pouvons alors, pour le désigner, écrire:

$$\eta_1(x_i, y_j, z_k, w_l)$$

Dans le second cas, les *valeurs* des prédicats η_2 et η_3 se transforment en *positions* du lieu dans l'espace. Du point de vue de la statistique multivariée, $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}(x_i, y_j)$ et $\eta_1(x_i, y_j, z_k, w_l)$ expriment des *données* équivalentes. Du point de vue de la *modélisation* par AC, cependant, la signification de ces notations diverge radicalement. En effet, lorsque le géographe-modélisateur détermine lesquelles, parmi les variables liées à un lieu, sont des prédicats et lesquelles, parmi elles, sont des coordonnées spatiales, son choix est analogue à celui qu'il opère en statistique, lorsqu'il détermine par exemple quelles sont les variables dépendantes et indépendantes d'un modèle de régression.

Pour comprendre pourquoi il en est ainsi, nous devons, en ce point, nous rappeler que les positions des lieux dans un espace donné reflètent, dans un cas idéal, leurs relations de voisinage, dérivées de la fonction de transition. En présentant donc son modèle en termes d'un espace à quatre dimensions plutôt que dans un espace bidimensionnel, le géographe insinue d'autres voisinages et, en conséquence, d'autres relations de détermination (cf. 6.3). Ainsi, selon l'expression $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}(x_i, y_j)$, les valeurs η_1 , η_2 et η_3 de (x_i, y_j) sont *dépendantes* des valeurs η_1 , η_2 et η_3 des voisins de (x_i, y_j) , donnés par la proximité dans l'espace bidimensionnel (X, Y) . Selon l'expression $\eta_1(x_i, y_j, z_k, w_l)$, par contre, l'unique prédicat dépendant – ou variable dépendante, pour utiliser un vocabulaire statistique – est η_1 . Les prédicats η_2 et η_3 , eux, ont été « figés »; ils sont devenus z et w , coordonnées *indépendantes* et *invariantes* d'un lieu dans l'espace (X, Y, Z, W) à quatre dimensions: Dans la dynamique du modèle, ils ne sont plus modifiés mais déterminent *quels* autres lieux de l'automate subissent l'influence de la valeur du prédicat η_1 du lieu (x_i, y_j, z_k, w_l) .

Dans une autre optique encore que celle de l'espace des variables, la multidimensionnalité constitue également une solution de choix au problème de la différence entre l'espace physique et l'espace de la géographie humaine; cela particulièrement relativement à la question des flux. En effet, dans un grand nombre de domaines de recherche géographique – comme, par exemple, dans la démographie spatiale – on s'interrogera sur le taux d'échange de personnes ou de biens entre deux

lieux. Ce taux d'échange – ce **flux** – peut adéquatement être représenté par une règle de transition donnant la *probabilité de transition* d'un agent d'un lieu x_i vers un lieu x_j . Formellement:

$$\varphi := \left(\eta(x_i, t_m) \geq n \right) \xrightarrow{\alpha} \begin{pmatrix} \eta(x_i, t_{m+1}) = \eta(x_i, t_m) - n \\ \eta(x_j, t_{m+1}) = \eta(x_i, t_m) + n \end{pmatrix}$$

où n est un nombre d'agents quelconque et α la probabilité pour ces agents de transiter de x_i en x_j

Nous avons ici à faire à une approche markovienne de l'espace, au sein de laquelle seuls les mouvements des agents – soient-ils biens, personnes, unités d'information... – d'un lieu à l'autre importent. Or, en géographie humaine, de tels échanges ne dépendent pas uniquement de leur distance dans l'espace physique bidimensionnel. Un flux migratoire peut dépendre de différences économiques, un flux de marchandises de l'existence de voies de communication plus ou moins rapides reliant deux lieux.... Il sera donc nécessaire, au géographe voulant rendre compte de tels flux, de reconstituer un espace dont les proximités rendent non pas compte des distances physiques mais des distances effectives entre les lieux, donnés par l'intensité de leurs flux mutuels: un espace dont la métrique reflète de tels taux d'échange. Et c'est ici encore que lui sont ouvertes les possibilités d'un espace multidimensionnel – des possibilités que nous examinerons plus en détail dans le chapitre 9.3.

7.4 Les espaces aux coordonnées non-cartésiennes

Tout AC ne consiste pas nécessairement en une matrice orthogonale. D'autres formes régulières, comme des triangles ou des hexagones, peuvent également être arrangées en matrices (Figure 16). À titre d'exemple, le premier modèle SIMPOP²⁸ fut construit sur la base d'un AC inscrit au sein d'un espace à découpage hexagonal. D'autres découpages encore de l'espace en entités distinctes ne sont pas même réguliers; ces derniers, en fait, constituent même une écrasante majorité dans le domaine du recensement administratif. Déjà TOBLER [1979] relève le problème que pose l'irrégularité de maillages administratifs à une modélisation cellulaire. ENGELN [2005] utilise néanmoins tout de même des unités spatiales déterminées selon le maillage administratif dans son modèle de l'occupation du sol. Le problème est donc abordable, quitte à résoudre un nombre de difficultés.

La difficulté principale des espaces de ce type est certainement de leur apposer un système de coordonnées permettant à la fois d'attribuer à chaque lieu un identificateur spatial unique et de faire en sorte que les relations de voisinage dont procède l'espace aient une expression formelle la plus compréhensible, du point de vue intuitif. Or, dans un espace non orthogonal, le voisinage d'un lieu ne peut être défini par une simple incrémentation des valeurs de coordonnées (cf. 6.3). À titre d'exemple, le voisinage de VON NEUMANN d'un lieu au sein d'une matrice triangulaire est donné par:

²⁸ SANDERS, PUMAIN, MATHIAN, GUÉRIN-PACE, BURA [1997].

$$\forall (i, j) \left(\psi^*(x_i, y_j) := \begin{cases} \{(x_{i+1}, y_j), (x_i, y_{j-1}), (x_i, y_{j+1})\} & \text{si } i \text{ impaire} \\ \{(x_{i-1}, y_j), (x_i, y_{j-1}), (x_i, y_{j+1})\} & \text{si } i \text{ paire} \end{cases} \right)$$

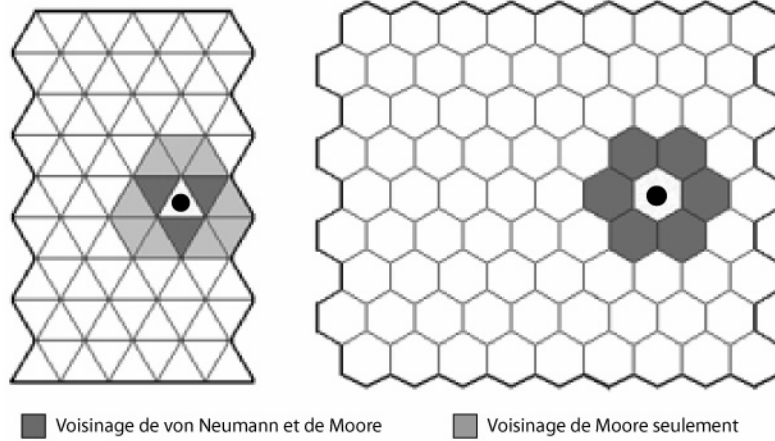


Figure 16: Matrices cellulaires triangulaire et hexagonale à 9 dimensions. Inscrit est à chaque fois un lieu avec ses voisins contigus (VON NEUMANN) et ses voisins par sommet commun (MOORE).

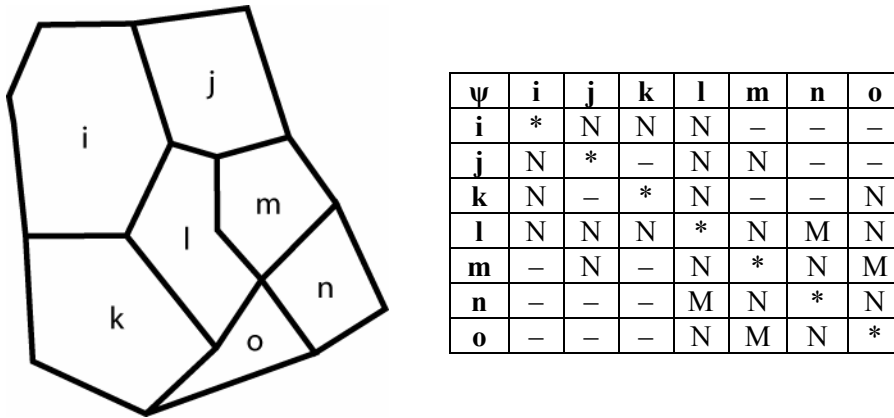


Figure 17: Maillage administratif dans l'espace physique et la matrice de voisinage qui représente son espace du point de vue d'un AC. Les voisins contigus sont marqués par un N, les voisins par sommet commun par un M. Remarquons que les voisins de type M sont pratiquement inexistant dans les découpages administratifs de l'espace physique.

Dans les cas irréguliers, résultant par exemple d'une partition de VORONOI²⁹ ou d'un simple découpage administratif de l'espace, une expression de type $\forall(i, j)$ est carrément impossible. Pour représenter l'espace de manière formelle – c'est-à-dire, d'une manière traitable par AC – une **matrice de voisinage** devient alors indispensable (Figure 17).

7.5 Polygones, tores et sphères: l'incidence du voisinage des lieux limitrophes sur la forme de l'espace

Tournons nous, à présent, vers l'importante question du voisinage des lieux limitrophes. D'une certaine façon, la carte géographique classique peut être considérée comme bonne illustration de la géométrie riemannienne. Elle est, fondamentalement, un espace de moindre dimension suivant la courbure d'un espace de dimension plus haute. Cela lui donne des propriétés non-euclidiennes banales à première vue mais porteuses d'un nombre important de questions concernant l'espace géographique et sa représentation. Ainsi, qu'advient-il d'un agent géographique se déplaçant en ligne droite que son itinéraire mènerait en dehors des limites d'une carte donnée? S'il continue son chemin, il ressurgira éventuellement au bout opposé de la carte qu'il avait quittée! Car, bien que représenté d'habitude en deux dimensions, l'espace géographique est fondamentalement sphérique. Dans la représentation cartographie, ce problème est résolu par toute une série de projections présentant chacune ses avantages et inconvénients.

Dans le cadre des AC, le même problème doit être abordé du point de vue matriciel. La question qui se pose dans ce cas est de savoir *qui sont les voisins d'un lieu limitrophe*. Cette question peut obtenir essentiellement cinq réponses distinctes, formulées toutes en termes de la nature des limites³⁰ d'une matrice cellulaire: ces limites peuvent être *absentes*, *closes*, *réflexives*, *constantes* ou *périodiques*.

Le cas de **limites closes** est le plus simple parmi les espaces limités mais n'est applicable que lorsque les règles de transition sont de nature totaliste (*cf.* 6.3), ainsi que cela se présente, par exemple, dans le Jeu de la Vie. Dans ce cas, les lieux limitrophes ont simplement moins de voisins. En géographie, les frontières closes se présentent lorsqu'un phénomène géographique est circonscrit par une discontinuité spatiale infranchissable. Cela est le cas d'une île physique mais peut également se présenter sous d'autres formes. Jusqu'à la chute du Mur, par exemple, Berlin-Ouest représentait une île du point du mouvement des populations ou de la possible extension de l'espace habité de la ville.

Un espace aux **limites absentes** est soit un espace *infini*, soit un espace *fini mais illimité*³¹, le deuxième cas étant justement celui du globe terrestre du point de vue de sa surface. Dans un AC effectif, c'est-à-dire, simulé par un ordinateur, tout espace cellulaire infini est potentiellement ingérable car le phénomène simulé dépasse tôt ou tard la capacité de calcul de la machine – cela à moins que le phénomène ne s'*auto-limite* dans l'espace, ainsi que cela est tout de même le cas pour la majorité des autophénomènes (5.2).

²⁹ *cf.* BENENSON, TORRENS [2004], 23, 240. *cf.* <http://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html>

³⁰ « Boundary conditions ».

³¹ « Finite but unbounded ».

Un espace illimité mais fini ne pose pas ce problème. Si le géographe veut cependant donner à cet espace la forme d'une sphère et représenter celle-ci de manière cellulaire, il est contraint à l'usage d'une matrice sphérique – objet dont la manipulation mathématique est loin d'être anodine, bien qu'aucunement impossible (Figure 18).

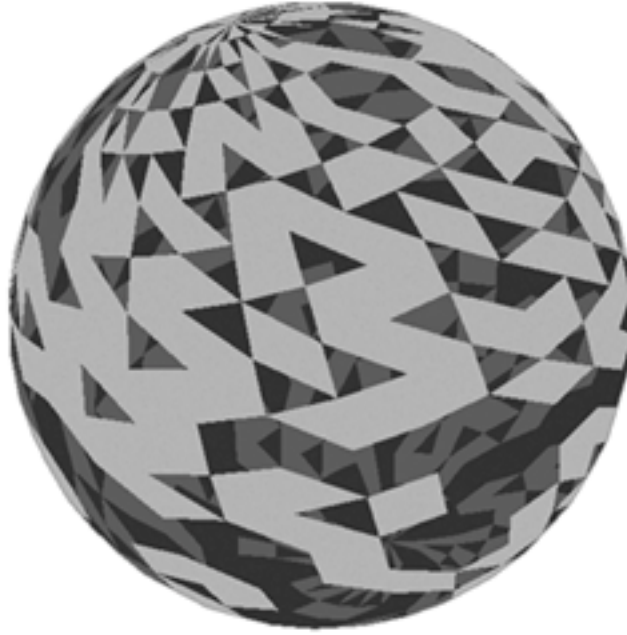


Figure 18: AC sphérique à grille triangulaire. Chaque lieu de cet automate a exactement trois voisins. La difficulté, ici, est de rendre compte de la contiguïté des lieux de manière formelle. (Simulation de SPHERECA des REDFISH LABS³²)

Par confort de représentation bidimensionnelle, cependant, la majorité des chercheurs³³ modélisent l'espace fini illimité en définissant les **limites** comme **périodiques**³⁴. Dans ce cas, tout lieu limitrophe a également pour voisin le lieu à l'extrême opposé de la matrice cellulaire. Prenons, pour l'exemple, un automate bidimensionnel à quatre lieux arrangés de la manière suivante:

$$\begin{array}{cccc}
 (x_i, y_i) & (x_i, y_j) & (x_i, y_k) & (x_i, y_l) \\
 (x_j, y_i) & (x_j, y_j) & (x_j, y_k) & (x_j, y_l) \\
 (x_k, y_i) & (x_k, y_j) & (x_k, y_k) & (x_k, y_l) \\
 (x_l, y_i) & (x_l, y_j) & (x_l, y_k) & (x_l, y_l)
 \end{array}$$

Si l'on définit les limites comme périodiques, alors $\Psi(x_i, y_i) = \{(x_i, y_i), (x_l, y_l), (x_l, y_i), (x_l, y_j), (x_i, y_l), (x_i, y_j), (x_j, y_l), (x_j, y_i)\}$, $\Psi(x_i, y_j) = \{(x_i, y_j), (x_l, y_l), (x_l, y_j), (x_l, y_k), (x_i, y_i), (x_i, y_k), (x_j, y_l), (x_j, y_j), (x_j, y_k)\}$, etc.

³² <http://www.redfish.com/research/sphere2dCA.htm>

³³ Ainsi, par exemple EPSTEIN, AXTELL [1996], dans leur modèle « Sugarscape ».

³⁴ WEIMAR [2000].

L'ensemble de ces relations de voisinage peut être représenté d'une manière plus expressive en inscrivant dans les marges de toutes les extrémités de la matrice le lieu du côté opposé:

(x_l, y_l)	(x_l, y_i)	(x_l, y_j)	(x_l, y_k)	(x_l, y_l)	(x_l, y_i)
(x_i, y_l)	(x_i, y_i)	(x_i, y_j)	(x_i, y_k)	(x_i, y_l)	(x_i, y_i)
(x_j, y_l)	(x_j, y_i)	(x_j, y_j)	(x_j, y_k)	(x_j, y_l)	(x_j, y_i)
(x_k, y_l)	(x_k, y_i)	(x_k, y_j)	(x_k, y_k)	(x_k, y_l)	(x_k, y_i)
(x_l, y_l)	(x_l, y_i)	(x_l, y_j)	(x_l, y_k)	(x_l, y_l)	(x_l, y_i)
(x_i, y_l)	(x_i, y_i)	(x_i, y_j)	(x_i, y_k)	(x_i, y_l)	(x_i, y_i)

La notion de limites périodiques devient encore plus claire lorsque l'on représente l'espace qu'engendre une telle matrice (Figure 19.a).

Comme il est possible de voir, cet espace n'a pas la forme d'une sphère mais celle d'un tore. Il pourrait donc être aisément objecté qu'il est par cela inadéquat à représenter une réalité géographique. Cela reviendrait cependant à affirmer que cette réalité et l'espace qu'elle évoque ne serait concevable qu'en termes d'une géométrie particulière. Au vu des considérations sur la construction de l'espace que nous avons exposées dans le chapitre 6.3, une telle affirmation nous paraît erronée. Rien ne prouve, en effet, que l'enchevêtrement complexe des relations entre les entités de la géographie humaine soit toujours mieux représenté au sein d'une géométrie sphérique qu'au sein d'une géométrie torique. Parce que la surface du tore conserve le caractère fini et illimité, son adoption nous paraît une solution adéquate pour la simulation de phénomènes exigeant ce type d'environnement.

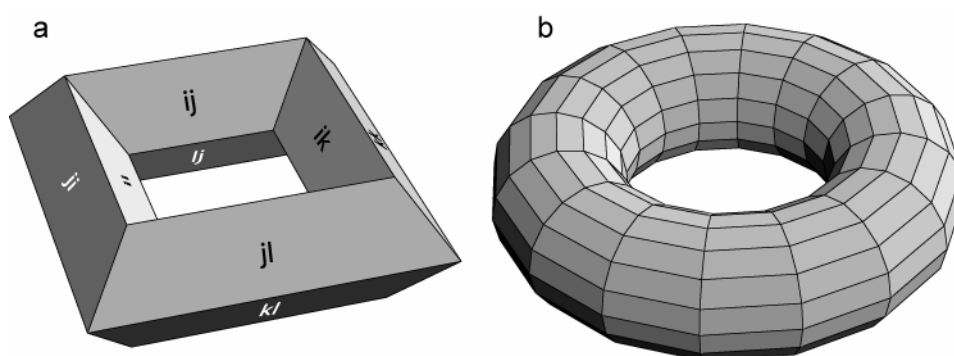


Figure 19: Tores: (a) représentant la matrice 4x4 aux limites périodiques de l'exemple; (b) représentant une matrice périodique 16x16.

Un quatrième type de limites est celui des **limites constantes**³⁵, obtenues en assignant à chacun des lieux extérieurs – circonscrivant l'AC – un état constant. À titre d'exemple, dans un AC bidimensionnel comprenant un prédicat à trois valeurs

³⁵ WEIMAR [2000].

possibles – $\{1, 2, 3\} \in \eta_1(x_i, y_j)$ – les états limites peuvent être définis de la manière suivante:

$\eta=1$	$\eta=1$	$\eta=1$	$\eta=1$	$\eta=1$	$\eta=1$
$\eta=1$	(x_i, y_i)	(x_i, y_j)	(x_i, y_k)	(x_i, y_l)	$\eta=3$
$\eta=1$	(x_j, y_i)	(x_j, y_j)	(x_j, y_k)	(x_j, y_l)	$\eta=3$
$\eta=1$	(x_k, y_i)	(x_k, y_j)	(x_k, y_k)	(x_k, y_l)	$\eta=3$
$\eta=1$	(x_l, y_i)	(x_l, y_j)	(x_l, y_k)	(x_l, y_l)	$\eta=3$
$\eta=2$	$\eta=2$	$\eta=2$	$\eta=2$	$\eta=2$	$\eta=2$

En géographie, ce type d'états limites reflète des frontières spatiales d'un phénomène. Contrairement aux limites closes, ce type de limites permet au géographe de définir des règles de transition non-totalistes et, surtout, de déterminer la nature des limites données. Il est, par exemple, possible de distinguer entre les frontières humaines et les frontières naturelles d'un phénomène. Cela a son importance, étant donné que l'occupation du sol ne se déploiera pas de la même manière le long d'une autoroute que le long d'une rivière.

Un dernier cas, celui des **limites réflexives**³⁶ est le mieux représenté par la matrice suivante:

(x_i, y_i)	(x_i, y_i)	(x_i, y_j)	(x_i, y_k)	(x_i, y_l)	(x_i, y_l)
(x_i, y_i)	(x_i, y_i)	(x_i, y_j)	(x_i, y_k)	(x_i, y_l)	(x_i, y_l)
(x_j, y_i)	(x_j, y_i)	(x_j, y_j)	(x_j, y_k)	(x_j, y_l)	(x_j, y_l)
(x_k, y_i)	(x_k, y_i)	(x_k, y_j)	(x_k, y_k)	(x_k, y_l)	(x_k, y_l)
(x_l, y_i)	(x_l, y_i)	(x_l, y_j)	(x_l, y_k)	(x_l, y_l)	(x_l, y_l)
(x_l, y_i)	(x_l, y_i)	(x_l, y_j)	(x_l, y_k)	(x_l, y_l)	(x_l, y_l)

Nous voyons qu'ici, l'état des lieux extérieurs circonscrivant la matrice reflète simplement l'état des lieux limitrophes. L'espace ainsi limité permet au géographe de simuler un espace clos, sans devoir renoncer à l'usage de règles de transition non-totalistes, et sans se voir dans l'obligation de définir le type de frontières circonscrivant un phénomène. Sans véritable analogie géographique, il s'agit surtout, dans ce dernier cas, d'épargner le processeur du computer de simulation tout en laissant les frontières du système aussi « ouvertes » que possible.

Tous les types de limites décrits ci haut sont en outre combinables dans un seul modèle. Ainsi, par exemple, une simulation d'autoroute (Figure 12, p. 54) est le mieux implémentée dans un espace aux limites périodiques dans l'axe de la circulation et aux limites constantes le long des bords.

³⁶ WEIMAR [2000].

III. Lieux, états et fonctions de transition comme abstractions géographiques de la réalité

Voilà que nous avons donné au modèle cellulaire des fondations conceptuelles et formelles, nécessaires à le définir. Nos objets délimités, nous devons nous consacrer, à présent, au parachèvement de leur articulation aux phénomènes géographiques et à la réalité dont participent ces phénomènes.

8 Le lieu et son état comme résultat de la topomorphose

Commençons par l'élémentaire, par l'unité dernière de tout AC qui n'est autre que le lieu. Nous ne voulons et ne pouvons néanmoins continuer à considérer le lieu de manière isolée. Dans le chapitre 6.2, nous avons vu qu'il n'existe pas, dans un AC, de sujet sans prédicat, de lieu sans état. Poussant cette réflexion plus loin, nous découvrons que les lieux sont ce qu'ils sont par leurs prédicats, par ce qu'ils *accueillent* et ce que, en fin de compte, ils *sont*, du point de vu prédicatif.

Nous avons vu, d'autre part, que la topographie des lieux émane de l'ensemble de leurs relations de voisinage qui, en dernière analyse, ne sont qu'objectivations¹ des *rapports* entre lieux exprimés dans la fonction de transition. Nous avons vu que c'est la relation qu'entretiennent les prédicats dans la temporalité qui génère l'espace. Comment, à présent, saisir le lieu cellulaire non seulement d'une manière synthétisant les définitions que nous en avons données, mais surtout d'une manière à éclairer le rapport qui existe entre celui-ci, le géographe modélisateur et la réalité modélisée? La solution nous paraît tenir dans la notion même du *lieu*², compris dans sa double nature de χώρα et de τόπος.

Prenons d'abord la notion de χώρα, ainsi qu'elle apparaît dans le Timée de PLATON. La χώρα surgit de la tension poétique de cette oeuvre à la fois comme contenant et contenu, un « ce en quoi » et un « ce quoi », exempt de toute forme mais ancré dans le κοσμός; ancrage qui lui permet d'accueillir – en *donnant lieu*, dans le Devenir, à l'Être atemporel et aspatial – les γέναι³, les formes diverses et éphémères se donnant à l'apperception humaine. Ainsi, et particulièrement chez le géographe Augustin BERQUE, la χώρα apparaît comme la possibilité même de la prédication, du rapport du lieu à la subjectivité humaine, collective ou individuelle⁴. Un lieu ainsi constamment *généré* et, par extension, un espace constamment *généré*, se distingue d'un pur « récipient immobile »⁵ que nous retrouverions non seulement dans la notion aristotélécienne du τόπος mais également dans une géométrie physique.

Bien que procédant ainsi de la χώρα, le lieu cellulaire ne peut pas pour autant y être assimilé. Car une fois le modèle construit, l'espace cellulaire établi, c'est bien à des τόποι que nous avons à faire, à des sujets donnés, articulés au sein d'un ensemble relationnel et s'offrant comme corps concrets aux prédicats de notre modèle. De même que les lieux quotidiens de la géographie vécue, les lieux cellulaires se donnent ainsi comme lieux-dits immobiles, comme sujets objectivés, comme résultats, momentanément figés dans la représentation, d'un processus que nous désignerons par le nom de **topomorphose**⁶.

¹ Le terme « réification » ou « hypostasie » pourrait ici être également utilisé. Nous préférons l'usage du terme « objectivation », car la notion renvoie à la constitution d'objets concrets. Leur connotation péjorative, léguée en grande partie par le courant réaliste en épistémologie, nous fait également éviter les deux autres termes. Remarquons, néanmoins, que la notion de réification est fréquemment utilisée en informatique et en intelligence artificielle pour désigner l'acte d'implémenter dans l'ordinateur d'un modèle considéré jusque là comme « abstrait ».

² BERQUE A., « Lieu » in LÉVY, LUSSAULT [2003].

³ Pl. de γενή (n.f.), le genre, relevant du monde relatif de la γένεσις.

⁴ BERQUE [1998].

⁵ « ἀγγεῖον ἀμετακινήτων »: ARISTOTE. *Physique*, livre IV.

⁶ Néologisme emprunté à TURCO [1997], constitué de la notion de τόπος et du verbe μορφώω, signifiant « donner forme à », « figurer » et surtout, pour nous, « représenter ».

L'un des processus essentiels de la topomorphose – notion que nous avons, en outre, traitée ailleurs⁷ de manière plus étendue – est celui de la noèse. En effet, les états d'un lieu, et avec eux, les lieux eux-mêmes, émergent comme objets d'un monde complexe d'intentionnalités individuelles et collectives. Chacun de ces objets, chacun de ces lieux, devient ainsi à la fois dépositaire et source d'une intention, d'une direction de l'activité humaine, d'un *sens*:

“There is a meaning to space as well as to time. Each place should equally be seen phenomenologically, in its relational context, as an object for a subject. To speak of a place is not to speak of an object alone, but of an image and an intent, of a landscape much in the sense of the Vidalian sense of the word. Thus place always has meaning, it is always 'for' its subject, and this meaning carries back not only to the intent of the subject, but also forward as a separate variable prompting the behaviour of a new generation of fellow men and contemporaries.”⁸

Du point de vue du modèle cellulaire, le sens du lieu – la teneur sémantique et intentionnelle du τόπος « mis en forme » – peut être décomposé en trois niveaux, ontologiquement distincts. Chacun de ces niveaux peut être défini en fonction de celui *pour qui* un lieu et son état est ce qu'il est. Nous avons, ainsi:

- L'état d'un lieu *pour les agents* du modèle simulé, ainsi que nous l'avons évoqué dans le chapitre 6.4.
- L'état d'un lieu *pour les autres lieux*. Celui-ci est défini par le rôle qu'un lieu joue dans la fonction de transition d'un autre.
- L'état d'un lieu *pour le concepteur et observateur* du modèle.

Celui qui, véritablement, procède à la topomorphose n'est évidemment que le concepteur et observateur lui-même. C'est lui qui définit l'ensemble des états *potentiels*, lui qui donne la topographie absolue du modèle. C'est lui, également, qui lègue aux deux autres sujets leur caractère de sujet.

Mais en leur léguant un Soi, il leur lègue l'autonomie d'*instancier*, dans la temporalité de la simulation du modèle, ce qu'il a défini comme *possible* dans le – relatif – absolu intemporel du modèle lui-même, considéré comme un tout. Ainsi, par exemple, lorsque le géographe définit, comme son modèle, un ensemble de lieux voisinant par contiguïté dans un espace euclidien infini, et qu'il place dans cet espace des agents initialement confinés à quelques lieux particuliers, ce n'est que par le déplacement de ces mêmes agents que les lieux plus distants acquièrent le statut ontologique d'être *pour* ces agents-ci, malgré le fait d'avoir toujours été *pour* le concepteur lui-même.⁹

Ce qu'il y a d'étonnant dans un modèle complexe comme celui des AC est le fait que les états qu'adoptent les lieux au fur de la simulation *ne sont pas* prévisibles pour son concepteur, ils ne lui sont pas d'emblée connus. Malgré donc le fait qu'il détermine toutes les conditions initiales et toutes les règles de transition, le géographe-modélisateur ne connaît pas leurs conséquences – il se fait, pour ainsi dire, demiurge étonné. Mais c'est précisément en cela que réside l'intérêt du modèle, comme nous aurons encore l'occasion de voir dans le chapitre 13.

⁷ OUREDNIK [2003].

⁸ LEY [1979], 228.

⁹ Nous remarquons que, vu ainsi, le modèle cellulaire – comme toute carte, comme toute œuvre – relève d'une représentation réduite du κοσμός.

Mais quelle est, à présent, la topomorphose accomplie par le géographe ? Car il y a plusieurs façons de l'accomplir, plusieurs façons de spatialiser un phénomène, plusieurs façons, également, d'en rendre compte en termes d'un AC. Le modèle cellulaire est, en effet, applicable dans un grand nombre de domaines allant de la physique des particules à la psychologie. Chacune de ces sciences a ses propres objets, ses propres états. Chacune a sa propre façon de représenter le phénomène qu'elle aborde et pour chacune, sa relation avec le phénomène donne naissance à un autre ensemble d'objets et de relations entre ceux-ci. À part au lieu, d'ailleurs, la signification du mot τόπος renvoie également au « sujet d'un discours », au « fondement d'un raisonnement » ou encore aux « principaux points d'une démonstration » – la *topographie* d'une science est ainsi également à comprendre comme *structure objective*¹⁰ qui incarne la science en question.

Ce n'est pas une discipline qui, préalablement établie, décide de la nature d'une telle structure, non, c'est cette structure même, entretenue et développée par un ensemble de chercheurs se disant de telle ou telle discipline, qui détermine ce qu'une discipline est. Et ce qu'est une telle structure est une interrogation permanente – la constitution d'une topographie géographique, qui s'accomplit au sein de la topomorphose géographique, est un processus continu de reformulation des éléments premiers de la structure objective de notre science. Parfois, des variables perdent leur sens, des relations objectivées s'avèrent incohérentes. Ce n'est pas en rendant un modèle complexe et dynamique que nous saurons leur redonner du sens et de la consistance mais en nous réinterrogeant constamment sur la pertinence de telles relations et variables, quitte à en éliminer certaines, quitte à chambouler, par cette élimination, l'ensemble du modèle, nous forçant, pour lui redonner teneur, à introduire des relations et variables nouvelles. La « topomorphose géographique » apparaît ainsi comme un processus d'objectivation permanent qui doit, afin de s'accomplir, remettre constamment en question ses propres produits. La question reposée une telle « topomorphose permanente » est la question existentielle de la géographie elle-même. Les AC, comme modèle géographique, sont un *instrument* de ce questionnement. Les exigences de la constitution d'un modèle cellulaire posent, en effet, cette question d'une manière qui donne à la topomorphose géographique une tournure nouvelle. En aucun cas, cependant, les AC ne constituent une réponse à cette question.

¹⁰ structure noétique ?

9 Le voisinage comme problème central de l'élaboration d'un AC

9.1 Qui est le voisin de X ?

Un état de lieu est un état *pour* autrui, ainsi que nous l'avons vu dans le chapitre précédent. Laissant de côté le niveau ontologique de l'observateur et des agents, il en découle que, au sein de la structure des lieux, ce qu'*est* un lieu se voit déterminé par les interactions avec d'autres lieux auxquelles il *peut* participer, c'est-à-dire, par l'ensemble des lieux se trouvant dans son horizon phénoménal.

Définir un lieu revient ainsi à définir un ensemble de telles interactions. Cela implique, alors, qu'afin de pouvoir définir *le* lieu, on se voit obligé de définir *les* lieux – de définir un ensemble de *ceux avec qui* le lieu interagit. Et voilà déjà le géographe engagé dans ce que l'on peut appeler une « spirale herméneutique », car la définition de l'ensemble des lieux ne peut pas, à son tour, être accomplie en dehors d'un concept donné des lieux individuels. Le processus d'élaboration du modèle cellulaire ressemble ainsi à un « éclaircissement progressif »¹¹ des relata et des relations de voisinage – un éclaircissement par va et vient constant entre les lieux individuels et la structure globale de leurs interactions.

Pourquoi cet éclaircissement se centre-t-il sur les relations de voisinage? Parce que c'est précisément en elles que s'exprime à la fois l'ensemble des lieux et la fonction de transition qui les lie. Pour connaître $\Psi(x_i)$, nous avons besoin à la fois de X et de Φ . C'est ainsi que l'expression « $\Psi = f(\Phi, X)$ » (6.3) acquiert tout son sens: elle rappelle qu'un AC géographique est essentiellement une structure de voisinage entre voisins, une structure de relations entre relata exprimées de manière spatiale. Elle montre qu'un AC ne peut être construit à partir d'aucun de ces deux éléments, pris de manière isolée. Elle constitue ainsi l'expression formelle de l'exigence d'éclaircissement progressif d'un AC, de l'objectivation progressive d'une géométrie capable de rendre compte du phénomène géographique observé.

C'est ainsi que l'expression « $\Psi = f(\Phi, X)$ » dévoile également toute l'ampleur de la tâche de constitution d'une structure objectuelle dont il était question dans le chapitre précédent. Nous voyons que le géographe, concevant les lieux et leurs influences sur la dynamique du phénomène observé, est sans cesse projeté en avant vers de nouveaux lieux. Ce n'est que la relation avec ces derniers qui parachève la compréhension de la teneur des lieux déjà conçus. Par le même processus, la relation elle-même se clarifie à son tour.

Souvent, il est vrai, le géographe pourra se servir de structures préexistantes, comme celle, très répandue, de l'espace physique. Les relations sont alors d'emblée données par des contiguïtés spatiales préconçues. Mais même dans un tel espace, le géographe doit objectiver des entités en procédant à son découpage. Il doit concevoir un maillage (cf. 7.4) qui corresponde à la nature du phénomène étudié. Là encore, il pourra se baser sur les acquis de sa discipline. Pour rendre compte d'un phénomène culturel, par exemple, il fera usage d'un découpage de l'espace selon les frontières des ethnies. Pour étudier un phénomène économique, un découpage en bassins économiques sera préférable. Voulant échapper aux contraintes des découpages administratifs mais désirant conserver les distances dans l'espace physique, il utilisera peut-être encore un

¹¹ « allmähliche Aufklärung »: DILTHEY [1910]

maillage régulier, comme celui du découpage hectométrique proposé par l'OFS Suisse dans les recensements décanaux.

Autre fois, cependant, le géographe sera effectivement obligé de construire soi-même l'espace de son phénomène. Cela sera même très souvent le cas dans le contexte d'une géographie des phénomènes modernes – phénomènes où les déplacements « ne se font plus de proche en proche, sur de courtes distances, qui sont du même ordre que la taille des particules, mais sur de longues distances »¹². Car l'espace d'une géographie moderne – en outre d'être encore un espace territorial, fortement lié à l'espace physique – est également un espace des flux de biens et d'information. La conception et la représentation d'un tel espace ne peut pas se baser sur un espace physique hypostasié dans une forme et un découpage particulier mais devra constituer, comme ses éléments premiers, des lieux et une matrice de flux entre ces lieux (*cf.* 7.4). Ces éléments premiers eux-mêmes seront souvent déjà donnés. Pour modéliser le transport aérien ou l'échange d'information à l'échelle mondiale, les lieux seront des aéroports ou des serveurs, les échanges seront des nombres de passagers ou d'octets. Il ne reste alors plus qu'à déterminer des fonctions de transition prévoyant les taux de ces échanges, selon les propriétés des aéroports et des serveurs. Il en sera de même dans la modélisation des flux migratoires entre deux régions éloignées à conditions socio-économiques divergentes.

Dans d'autres cas encore, cependant, même ces éléments basiques seront entièrement à déterminer, par la méthode d'éclaircissement progressif décrite plus haut. De tels éléments seront le résultat du développement dialectique de maintes questions actuelles. Comment, par exemple, modéliser les phénomènes de crime organisé? Quel est l'atome d'un réseau institutionnel? D'un réseau d'organisations internationales? Comment modéliser la réification de concepts dans les cultures? Comment modéliser la diffusion d'une langue, d'une religion?

Ce sont, en effet, de telles questions qui appellent à une réflexion fondamentale non seulement sur la notion de voisinage, mais également sur celle des éléments fondamentaux de la géographie entre lesquels de tels voisinages s'établissent. Voulant inscrire sa méthodologie au sein d'une géographie moderne, le concepteur de modèles cellulaires y sera inévitablement confronté.

9.2 D'où agissent les contraintes structurelles?

Une fois les problèmes proprement noétiques résolus, l'une des difficultés majeures que pose la conception d'un modèle cellulaire est celui de la prise en compte des contraintes contextuelles et structurelles¹³; contraintes de la politique publique, des organismes centrés, des contextes culturels – de tout ce qui distingue radicalement le modèle spatial d'une ville d'une colonie de bactéries observée au fond d'une boîte de Pétri.

La majorité de phénomènes géographiques ne se déploie en effet pas d'individu en individu à une seule échelle. La condition d'un ménage, par exemple, ne dépend qu'en partie de la condition des ménages voisins. Pour une part bien plus importante, cette condition est déterminée par des phénomènes se produisant à d'autres échelles:

¹² DAUPHINÉ [2003], 72

¹³ « structural constraints »: O'SULLIVAN [2004], 287

« Transformation des localisations des activités économiques et de leur rapport à l'espace, production et marchés du logement, politiques publiques de logements social et de planification urbaine, action de différents niveaux territoriaux de la puissance publique. »¹⁴. Si, d'un côté, « la contribution propre des agents spatiaux n'est pas réductible à un effet de macro-structures économiques et politiques », de l'autre, les comportements individuels « ne sont intelligibles sans la prise en compte d'effets de contexte structurants », qu'il s'agisse de ceux de la société, du climat ou des mouvements tectoniques.

Mais où placer les sources d'influence contextuelle au sein du modèle cellulaire? Plusieurs solutions, ici, s'offrent à nous.

Il y a d'abord celle, avancée par exemple par PHIPPS et LANGLOIS [1997], de l'extériorisation des certains processus dans un module « externe ». L'AC de base est dans ce cas muni d'un module qui simule de manière « aspatiale » certains processus contextuels et qui échange, avec l'ensemble des lieux, des données concernant ces processus. Penser le modèle en ces termes nous semble cependant limité car il ne propose que deux échelles phénoménales – l'une, explicitement spatiale, dans laquelle est exprimée l'occupation du sol au sein de l'espace euclidien; l'autre, considérée comme aspatiale, rendant compte des contraintes structurelles. L'extraction, en soi discutable, des contraintes structurelles de l'espace du modèle a ainsi pour effet d'en exclure également la notion d'échelle, notion de la plus haute importance en géographie. Pour rendre compte de cette notion, la construction d'un modèle multiscalaire nous semble donc incontournable.

En effet, quelle que soit l'échelle à laquelle on se trouve, il existe des dynamiques à d'autres échelles qui influencent le phénomène à l'échelle observée. Car bien que le principe de discontinuité trans-scalaire (5.1) postule la perte de propriétés ontologiques avec le changement d'échelle, il postule également la conservation de *certaines* propriétés d'échelle en échelle. D'autre part, le principe d'émergence permet d'opérer la transformation – donc l'influence – de prédicats propres à une échelle particulière en prédicats d'une autre échelle. Construire le modèle d'un phénomène revient donc à déterminer non pas son échelle mais *ses* échelles; à connaître *ses* espaces et *ses* maillages (Figure 20). Ainsi – pour reprendre l'exemple de la condition des ménages – alors que, à l'échelle d'une ville, l'occupation des habitats par telle ou telle classe sociale dépendra de l'occupation des habitats voisins, elle dépendra, par interaction avec l'échelle du réseau des villes, des échanges socioéconomiques avec les villes voisines.

L'horizon ultime de tout phénomène étant le monde (5.2), il faudra bien sûr procéder à une réduction. En aucun cas, il n'est possible de prendre en compte *tout* ce qui entre en compte dans un phénomène donné. Afin de garantir le caractère géographique du modèle cellulaire d'un phénomène, cependant, il sera toujours préférable de le développer sur plusieurs échelles géographiques.

¹⁴ PRETECEILE [1995], 7. Également pour les deux citations suivantes.

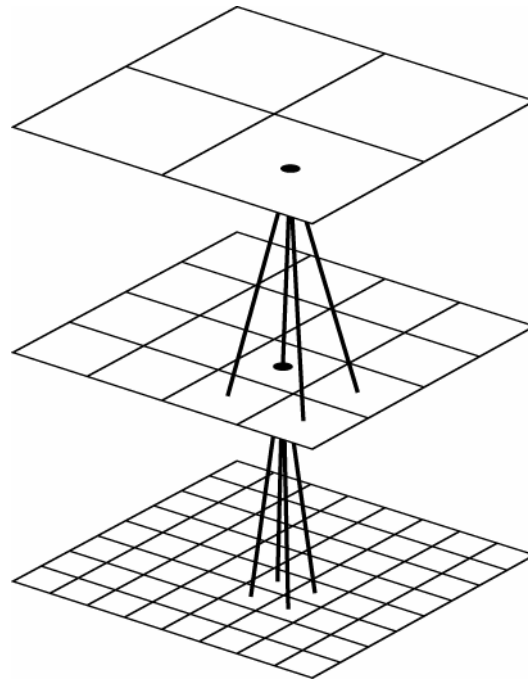


Figure 20: Différentes échelles d'un phénomène géographique et leurs influences. Ici, les échelles sont caractérisées par des maillages emboîtés répartissant plus ou moins finement l'espace bidimensionnel donné.

Comment, à présent, implémenter ces différentes échelles dans un modèle cellulaire concret? Généralement, cela peut être fait en définissant l'espace cellulaire dans plusieurs sets de dimensions. Ainsi, la Figure 20 peut être représentée comme un espace \mathbb{Z}^6 , avec les deux premières dimensions consacrées à l'échelle inférieure, la troisième et la quatrième dimension à l'échelle intermédiaire, et les deux dimensions restantes à l'échelle supérieure. Chaque contrainte structurelle se voit ainsi présente *dans l'espace*, occupant, en tant que lieu, une paire de dimensions particulière. De par l'orthogonalité des dimensions, la contrainte structurelle ne peut être confondue avec un individu particulier présent à une échelle plus basse.

Une telle approche multidimensionnelle permet peut-être également d'échapper à une certaine confusion existant entre les différentes échelles géographiques d'un phénomène et les différentes échelles spatiales de l'espace physique. En effet, seule une partie des effets de structure conserve une hiérarchie identique à celle de l'emboîtement spatial de ce dernier:

« While [scale-based hierarchies of the neighbourhood-region-nation-supranational block type] are relevant in some contexts as organizing frameworks, they decidedly do not reflect the untidy real-world geographies of multinational corporations, national states, stateless nations, terrorist networks, the Internet, protest campaigns, pressure groups, non-governmental organizations and the rest. »¹⁵

¹⁵ O'SULLIVAN [2004], 288

L'approche multidimensionnelle permet à chacune de ces structures nouvellement apparues dans le monde géographique d'être représentées et modélisées dans leur propre espace, indépendant de l'espace physique, tout en permettant de les laisser agir comme effets structurants sur les phénomènes déployés dans d'autres dimensions. Généralement, sur l'écran, les diverses paires de dimensions seront présentées comme surfaces distinctes, évoluant de manière conjointe. Mais cela nous amène déjà à la question du chapitre suivant.

9.3 Le voisinage cellulaire dans la représentation graphique

La géographie relève du *γραφή*, de l'art d'écrire ou de dessiner. Dans son approche des phénomènes du globe terrestre, le rôle accordé à la représentation visuelle est, sinon dominant, pour le moins incontournable. Savoir cartographier un modèle cellulaire fait donc partie des tâches centrales du géographe-modélisateur.

Évidemment, un AC en soi peut fonctionner tel quel; quelque soit son espace, il sera toujours possible de représenter chacun de ses états sous la forme d'une matrice plus ou moins complexe. C'est cette matrice seule que peut traiter le processeur d'un computer, c'est cette matrice seule qu'il peut produire comme résultat de ses calculs. Du point de vue de sa capacité à aider le géographe à penser son phénomène, néanmoins, une telle « représentation machine » est évidemment inutilisable.

Il s'agira donc de mapper les résultats dans un espace signifiant, dans un espace où la localisation respective des lieux, combinée à un système de signes, permettra à l'observateur de donner du sens à la série de changements d'états qu'ils subiront au cours de la simulation du modèle. Ce qu'est un tel « espace signifiant » dépend bien sûr de la formation de l'observateur, de sa langue, de sa culture, de son expérience passée, de sa physiologie... Il ne nous revient pas de refaire le complexe et passionnant débat de la sémiologie générale. Considérons donc comment représenter le dynamique d'un modèle cellulaire avec les outils cartographiques que connaît tout géographe.

Ce problème, malheureusement, est souvent abordé à l'envers. Partant de l'espace bidimensionnel – objectivé par une cartographie de conquête territoriale et de navigation maritime – le géographe *présuppose* plus ou moins consciemment, plus ou moins explicitement, que deux lieux adjacents dans *cet espace* particulier sont en une relation d'échange. C'est *à partir de* cet espace et *à partir de* ces relations qu'il construit le modèle cellulaire supposé l'aider dans sa compréhension d'un phénomène observé. Le degré de compréhension relève alors du hasard de l'adéquation d'un espace aprioriquement adopté à la réalité géographique du phénomène choisi.

La méthode donnera, bien sûr, des résultats satisfaisants lorsque l'adjacence dans l'espace physique joue un rôle dominant au sein du phénomène observé. Tel est le cas, particulièrement, pour les phénomènes de la géographie physique ou pour des phénomènes de la géographie humaine à fort lien avec la corporéité: nous pensons à l'épidémiologie à échelle réduite, à la propagation de l'information dans un temps d'avant la technologie de télécommunication, aux phénomènes de conquête territoriale ou d'étalement urbain de la ville industrielle. Même en procédant à une méthodologie inverse, menant d'un système de relations et de relata à une *représentation* au sein de

\tilde{N}^2 , la carte *constituée* par un processus d'abstraction sérieux ressemblera fortement à la carte *présupposée* au sein d'une approche plus candide.

Laissons, pour cette raison, de côté les phénomènes plus aisément représentables pour nous consacrer à ceux exposant de plus grandes difficultés. Comment, en effet, rendre compte de la proximité thématique de lieux dont l'état englobe à chaque fois plus d'une centaine de variables? Comment représenter le voisinage d'un lieu alors que la forme de la fonction de transition revoie à un espace à 14 dimensions, comprenant des phénomènes de communication, de transport, d'échange économique etc.? Comment rendre compte des agents implicites, de leur nombre, de leur nature?

De nombreux chercheurs donnent déjà, par leur pratique, des réponses intéressantes à de telles questions. Prenons par exemple un cas de phénomène multiscalaire. Dans son modèle de l'occupation du sol aux Pays-Bas, prenant en compte des phénomènes aussi divers que l'économie nationale, la démographie, l'environnement ou le transport, Guy ENGELN [2005] se voit non seulement confronté à plusieurs échelles mais également à plusieurs espaces.

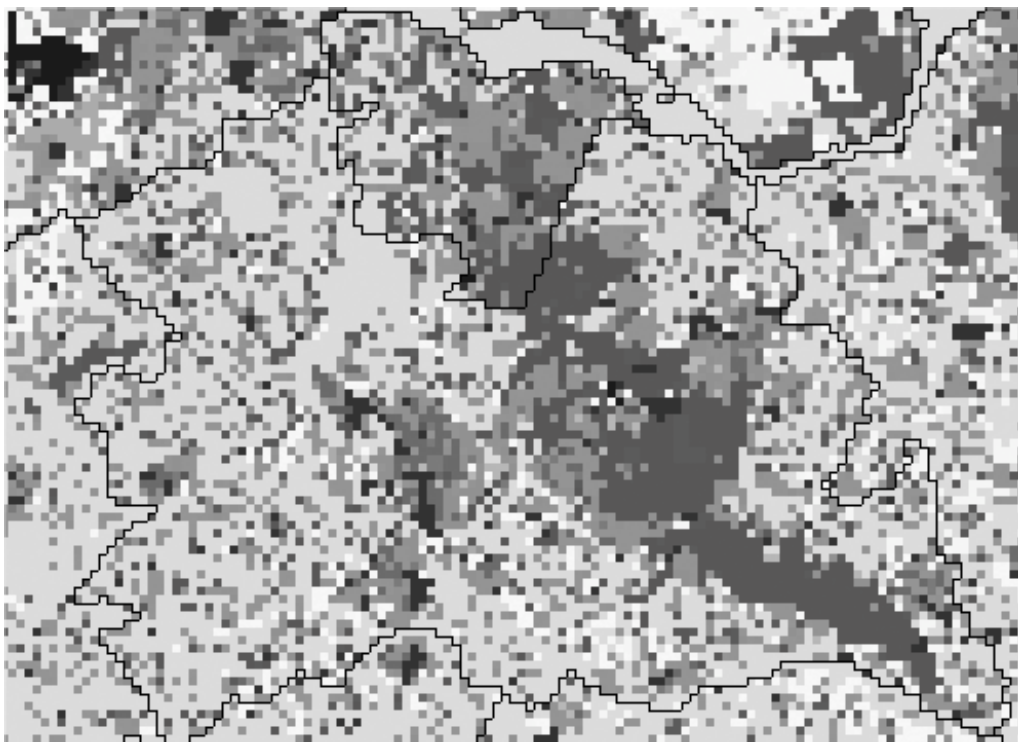


Figure 21: Carte raster de l'occupation du sol aux Pays-Bas, à l'échelle de 351'000 lieux de 25ha. La couleur des lieux est attribuée en fonction de l'occupation du sol. (Détail, adapté de ENGELN [2005]).

De par le fort lien de l'occupation du sol à l'espace physique, ENGELN choisit de représenter les résultats de ses simulations dans cet espace, découpé selon un maillage régulier. L'observateur peut alors se rendre directement compte de l'autocorrélation spatiale de l'occupation du sol à l'échelle des 25ha (Figure 21). La proximité

euclidienne à cette échelle et dans cet espace détermine le voisinage des lieux et joue ainsi un rôle déterminant dans les règles de transition.

D'autres dynamiques de l'automate, elles, sont cachées dans d'autres espaces et échelles. L'une d'entre elles, la migration nationale, relie par exemple des lieux non contigus dans l'espace physique. Afin de rendre compte de ces échanges – et des règles de transition qui se basent dessus – tout en garantissant la compréhension par l'observateur de la représentation obtenue, ENGELEN fait usage d'une carte de flux classique (Figure 22). Dans cette représentation, le fond de carte permet à l'observateur de se repérer dans l'espace connu de la carte politique, alors que les flèches de migration lui permettent de connaître le voisinage effectif, dans l'AC, d'une unité spatiale donnée. Vu que c'est de migration de personnes qu'il s'agit ici, ENGELEN parvient par la même représentation à rendre compte des agents – individus – implicitement pris en compte dans le modèle.

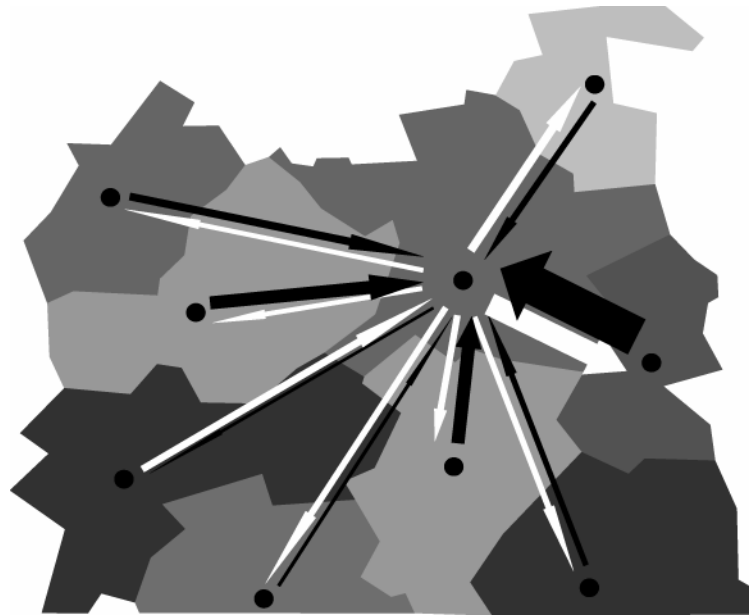


Figure 22: Carte de flux traditionnelle, représentant le flux migratoire entre une unité spatiale et ses voisines à l'échelle des 40 régions COROP des Pays-Bas (détail, adapté de ENGELEN [2005]).

Nous voyons ainsi que des outils cartographiques connus depuis longtemps *suffisent* fort souvent à eux seuls à la représentation de processus géographiques complexes modélisés par un AC – pour le peu, du moins, qu'un certain lien avec l'espace physique demeure présent. L'attachement à cet espace a néanmoins ses limites, même dans la représentation. Imaginons, par exemple, que *tous* les flux entre les unités spatiales de la Figure 22 dussent être représentés. La carte en deviendrait rapidement incompréhensible. D'autre part, il est à se demander si l'idée de la *proximité* des unités spatiales que se fait l'observateur de la Figure 22 correspond vraiment à celle qui reflète la nature de l'AC construit et que l'on voudrait lui faire adopter. En effet, malgré l'épaisseur significative des flèches, les unités administratives conservent leurs distances respectives, héritées de l'espace physique.

Imaginons encore que l'on veuille rendre compte de règles de transitions stochastiques dont la probabilité d'application serait directement proportionnelle à la *proximité thématique* des lieux. Gardant à l'esprit que l'espace de représentation final ne sera autre que l'espace bidimensionnel de la surface du papier, au sein duquel une plus grande proximité entre les lieux laisse l'observateur supposer une plus grande similarité ou un plus grand taux d'échange, comment nous prendrons nous à y inscrire tout cela de manière plus adéquate?

Commençons par la question de la proximité thématique. Du chapitre 7.3, nous savons que celle-ci s'exprimera souvent dans un espace multidimensionnel. Afin de ramener un tel espace à une représentation bidimensionnelle, ce qui se présente comme solution s'avère être, encore une fois, une méthode utilisée en géographie depuis de nombreuses années: en effet, l'*analyse factorielle* est l'outil le plus adéquat à la projection d'un hyperespace quelconque sur un espace à dimension plus basse donné. Utilisé d'habitude pour simplifier un espace de variables, ce même outil peut être parfaitement appliqué à la représentation de la proximité thématique de lieux cellulaires.

Qu'en est-il alors des AC dont les règles de transition reproduisent des mécanismes de flux, d'une manière que nous avons également abordée dans le chapitre 7.3? Essentiellement, la solution sera la même, avec un pas intermédiaire venant s'ajouter. En partant des matrices de flux, il faudra d'abord repositionner les lieux dans un espace dont la métrique reflétera le taux d'échange entre les lieux. Pour parvenir à cela, BAVAUD [2003, 2005] propose de commencer par définir une matrice de *covariance du champ* héritant de la structure spectrale de la matrice de flux entre les lieux. L'obtention des covariances à partir des flux se fait ici par un modèle auto-régressif dont les poids spatiaux associés sont justement définis par le flux. Une telle matrice permet ensuite « de définir un variogramme, qui est le carré d'une distance (thématique) entre paires de régions, euclidienne par construction. La reconstruction de ce dernier par le "*multidimensional scaling*" permet [enfin] de créer des cartes factorielles des distances entre régions, uniquement déterminées par les flux échangés ». C'est ainsi que se présente enfin, dans une représentation graphique compréhensible, un espace entièrement construit à partir du phénomène observé.

Évidemment, nous n'avons abordé ici que quelques solutions particulières à la problématique de la représentation graphique des AC complexes. D'autres questions, encore, se posent. Il faudra par exemple se demander comment spatialiser, dans une représentation graphique, une fonction de voisinage tenant compte de la nature de l'environnement des lieux¹⁶ – du fait que le voisinage d'un lieu urbain est quantitativement différent de celui d'un lieu rural ou d'un lieu d'avant-poste dans un environnement austère. Répondre à de telles questions sera l'un des enjeux majeurs de la modélisation géographique à venir. Nous pensons qu'il s'ouvre là un champ de recherche passionnant à explorer.

¹⁶ TOBLER [1979], 382

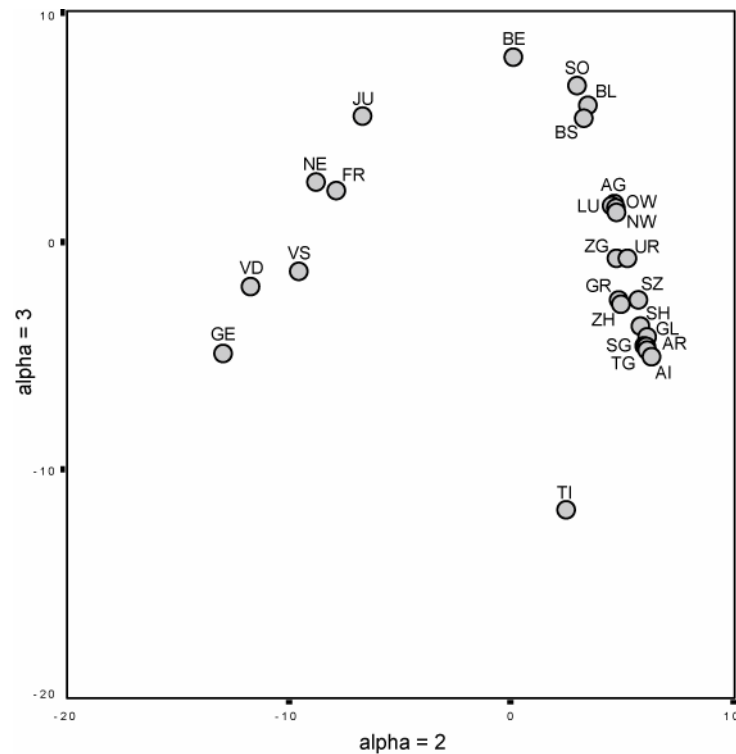


Figure 23: Cantons suisses, dans l'espace factoriel construit à partir de leurs échanges. Remarquons que les dimensions présentées ici correspondent au 2^e et 3^e facteur – $\alpha = 1$ et $\alpha = 2$ – car le premier facteur est trivial, comme il l'est au sein d'une analyse factorielle des composantes. (Adapté de BAVAUD [2003])

10 Des fonctions aprioriques vers des fonctions extrapolées

Il ne nous reste plus, dans la présente partie de notre mémoire consacrée aux problèmes de l'abstraction des phénomènes géographiques, qu'à nous interroger sur les façons de définir une fonction de transition transcrivant de manière adéquate un phénomène donné dans la dynamique de l'AC.

En effet, dans les AC canoniques, comme le « Jeu de la Vie », la « Fourmi de Langton » ou le « Modèle de Ségrégation de Schelling », les règles de transition sont toujours préconçues. Le scientifique s'en voit réduit à l'observation des résultats des conditions initiales, entièrement imaginées par lui-même.

Dans une science à forte orientation empirique comme la géographie humaine, une telle approche paraît insuffisante. Certes, nous verrons plus loin (13) que d'explorer le déploiement effectif, dans la simulation, de nos présuppositions sur les règles dynamiques régissant un phénomène géographique donné constitue en soi un instrument de recherche précieux; mais souvent, nous ne possédons que de vagues hypothèses face à un phénomène complexe. Nous avons alors besoin d'un outil afin de pouvoir formuler des hypothèses plus solides, des règles à tester. Et l'unique façon dont un AC peut servir de tel outil est lorsqu'il s'avère capable de formuler ses propres règles de transition, à partir d'une série diachronique de configurations spatiales.

Comme le développement actuel des SIG rend de plus en plus accessibles de telles séries de configurations, nous proposons de considérer, dans les sous-chapitres suivants, quelques façons concrètes d'en extraire des fonctions de transition réalistes.

10.1 Entraînement des réseaux neuromimétiques

Déjà en 1996, une équipe de chercheurs¹⁷ proposait de laisser le computer deviner les règles de transition reliant une série diachronique de configurations d'un AC à l'aide de réseaux neuromimétiques¹⁸.

Un **réseau neuromimétique** consiste en une série d'unités d'« entrée », une série d'unités intermédiaires « cachées » et une ou plusieurs unité(s) de « sortie », reliées en séquence par des liens d'un certain poids.

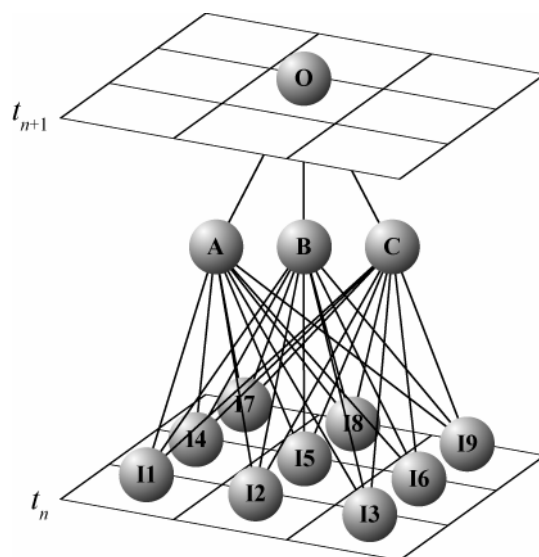


Figure 24: Réseau neuromimétique implémenté au sein d'un AC à un seul prédicat par lieu, dont l'espace procède d'un voisinage de MOORE. Les entrées du réseau sont ici données $H(\Psi(x_i, t_n)) = \{11, \dots, 17\}$ (comme « Input » 1-7); Les sorties sont données par $H(x_i, t_{n+1}) = 0$ (comme « Output »); A, B et C sont les unités cachées. Le réseau neuromimétique ainsi constitué parvint à reproduire sans faute un développement déterminé par la fonction de transition du Jeu de la Vie. (Adapté de OLLIGSCHLAEGER, GORR [1997].)

Parce que contenant déjà de telles unités, l'implémentation d'un réseau neuromimétique au sein d'un AC se trouve particulièrement aisée. Comme entrées, on prend l'ensemble $H(\Psi(x_i, t_n))$, c'est-à-dire, l'ensemble des états des lieux voisins d'un lieu x_i . Comme sorties, on définit $H(x_i, t_{n+1})$, l'état du lieu x_i dans l'itération suivante. La ou les unités cachées constituent le pas intermédiaire, la représentation interne et simplifiée de la configuration complexe de $H(\Psi(x_i, t_n))$. Il reste alors à déterminer

¹⁷ OLLIGSCHLAEGER, GORR [1997].

¹⁸ Pour des précisions sur les réseaux neuromimétiques ainsi que sur leur usage dans les sciences humaines, voir p. ex. GILBERT, TROITZSCH [1999].

l'ensemble des **poids** Π reliant les valeurs des unités aux valeurs des unités de la couche supérieure, ainsi que cela est montré dans la Figure 25.

Dans un premier temps, les poids du réseau sont déterminés de manière aléatoire. Ensuite, par un processus dit de « rétro-propagation de l'erreur », ils sont calibrés en se basant sur un set de données d'entrée liées à des sorties connues. En géographie humaine, de telles données consisteront en une série diachronique de configurations d'un espace donné, toute configuration étant liée à la connue par la connaissance de la configuration suivante. La calibration se fait en fonction des écarts entre la configuration future prédite et la configuration future réelle, le poids des connexions diminuant au fur des itérations de calibration, en fonction de la part jouée par une connexion dans la production de l'écart à la réalité global. À la fin de la calibration – ou de l'« entraînement », comme l'on dit souvent dans le contexte des réseaux neuromimétiques – une fonction de transition est formulée. Dans le réseau montré dans la Figure 25, par exemple, la fonction de transition Φ calibrée consiste alors en trois règles de transition avec:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &:= \eta_1(x_3, t_{n+1}) = \pi_1 A + \pi_4 B \\ \varphi_2 &:= \eta_2(x_3, t_{n+1}) = \pi_2 A + \pi_5 B \\ \varphi_3 &:= \eta_3(x_3, t_{n+1}) = \pi_3 A + \pi_6 B\end{aligned}$$

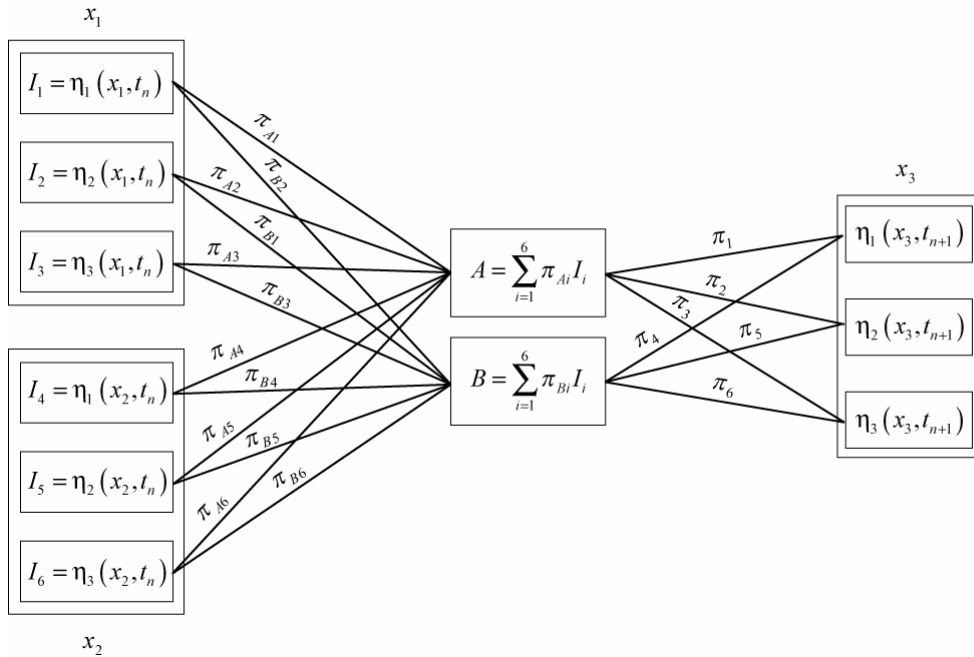


Figure 25: Réseau neuromimétique intégré à un AC à trois prédicats par lieu, conçu pour deviner $H(x_3, t_{n+1})$, lorsque $\Psi(x_3) = \{x_1, x_2\}$. L'exemple montre le réseau neuromimétique à deux unités cachées, A et B. $\Pi = \{\pi_{A1}, \dots, \pi_{A6}, \pi_{B1}, \dots, \pi_{B6}, \pi_1, \dots, \pi_6\}$.

Le présent exemple ne donne bien sûr qu'une version simplifiée d'une telle fonction de transition. Dans un réseau neuromimétique plus complet, les taux d'activation des unités cachées et de sortie, par exemple, sont transformés à l'aide d'une *fonction*

d'activation non-linéaire – généralement la fonction logistique sigmoïde. D'autre part, en absence de tout espace hypothétique, on déterminera $\Psi(x_i) = X$, c'est-à-dire, chaque lieu aura pour voisin tous les autres lieux de l'AC, y compris soi-même.

Notons enfin que, bien que les réseaux neuromimétiques constituent un outil d'analyse puissant, leur application en géographie n'est malheureusement pas dépourvue de problèmes. Le plus central de ceux-ci, comme relève ENGLÉN [2005], est le fait qu'il est difficile d'interpréter ce que les règles formulées veulent dire – il est difficile de leur donner une signification et moins encore d'en déduire des conclusions normatives. En effet, le résultat d'un réseau neuromimétique n'est pas communiqué en termes de règles de transition claires, mais en termes d'un ensemble Π de poids, souvent opaque au chercheur.

10.2 Évolution par algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques¹⁹ furent développés en mimant le processus de sélection naturelle, procédant à la fois par combinaison des gènes lors de la reproduction et par une plus haute probabilité de « survie », jusqu'à l'âge de la reproduction, d'êtres possédant une forme plus adéquate à l'environnement donné.

Ce qui rend possible un algorithme génétique est une population – dans notre cas, une population de fonctions de transition – dont les individus produisent une descendance héritant des caractéristiques combinées de leur « parents ». Après la reproduction, les « parents » meurent et seuls les descendants les mieux adaptés se reproduisent, formant une génération suivante. À la longue, émerge une population d'individus le mieux adaptés à leur environnement. Dans notre cas, le taux d'adaptation d'une fonction sera inversement proportionnel à l'écart entre des configurations spatiales prédites par cette fonction et les configurations réelles, connues dans une série diachronique de configurations spatiales.

Comment, cependant, se fait la production de descendance de couples de fonctions de transition? Tout d'abord, il s'agit de coder une fonction de transition de manière à ce qu'elle représente un *gène* combinable avec d'autres fonctions. Chaque *chromosome* d'un tel gène représentera une règle de transition particulière, choisie parmi un ensemble de règles, déterminées nécessairement de manière apriorique par le chercheur. Le nombre de chromosomes d'un gène sera fixe pour tous les individus. Considérons par exemple un AC dont chaque lieu possède un seul prédicat, pouvant prendre trois valeurs différentes: 1, 2 et 3. Prenons un lieu x_3 dont le voisinage est donné par $\Psi(x_3) = \{x_1, x_2\}$. Les règles de la combinatoire nous donnent $3^2 = 9$ configurations possibles du voisinage de x_3 . Pour chacune de ces configurations, il s'agit de déterminer une *règle de transition* particulière – que nous écrirons ϕ_i – déterminant l'état de x_3 dans l'itération suivante. Afin de pouvoir prendre en compte toutes les configurations possibles, toute *fonction de transition* déterminant l'état futur de x_3 sera nécessairement composée de neuf règles de transition. Nous aurons $\Phi = \{\phi_1, \dots, \phi_9\}$. Deux fonctions de transition particulières seront alors par exemple:

$$\Phi_1 = \{\phi_{11}, \phi_{23}, \phi_{32}, \phi_{43}, \phi_{53}, \phi_{61}, \phi_{71}, \phi_{81}, \phi_{91}\}$$

¹⁹ Pour des précisions sur les algorithmes génétiques ainsi que sur leur usage dans les sciences humaines, voir p. ex. GILBERT, TROITZSCH [1999].

$$\Phi_2 = \{\Phi_{12}, \Phi_{21}, \Phi_{32}, \Phi_{41}, \Phi_{52}, \Phi_{63}, \Phi_{71}, \Phi_{83}, \Phi_{93}\}$$

En tout, il y a $3^9 = 19'683$ fonctions de transition possibles. L'algorithme génétique servira à choisir la meilleure d'entre elles.

À cette fin, n fonctions aléatoires seront initialement générées. Un certain nombre $m < n$ parmi ces fonctions sera sélectionné: On choisira, p.ex., les cinquante premières prédisant au mieux l'état futur de l'AC. Des couples de ces fonctions sélectionnées seront ensuite aléatoirement formés.

Admettant que Φ_1 et Φ_2 soient choisies pour former un couple, elles se combineront par deux opérateurs génétiques: le *crossover* et la *mutation*. Le **crossover** implique le scindement des deux gènes en une même position, et la mise à bout des morceaux, ainsi que cela est montré dans la Figure 26.

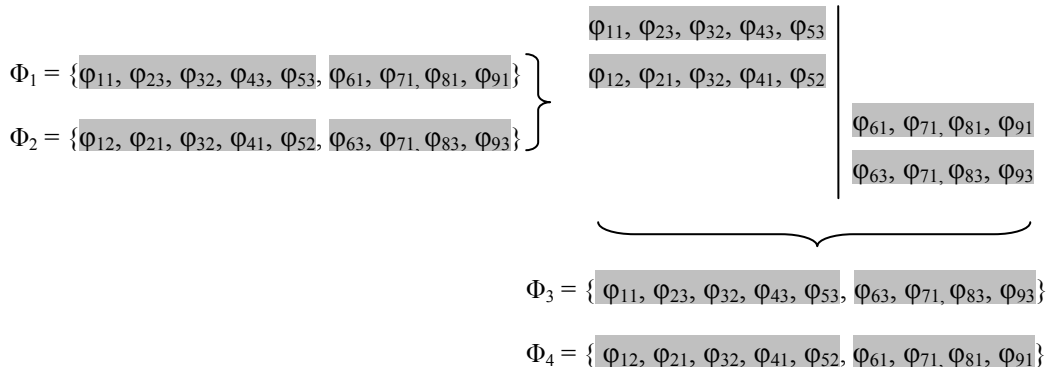


Figure 26: Le *crossover* de Φ_1 et de Φ_2 , produisant deux descendants, Φ_3 et Φ_4 .

Lors de la **mutation**, une petite partie des gènes de la descendance sera modifiée de manière aléatoire. Les descendants de Φ_1 et de Φ_2 après la mutation seront par exemple:

$$\Phi_3 = \{\Phi_{11}, \Phi_{23}, \Phi_{31}, \Phi_{43}, \Phi_{53}, \Phi_{63}, \Phi_{71}, \Phi_{83}, \Phi_{93}\}$$

$$\Phi_4 = \{\Phi_{12}, \Phi_{21}, \Phi_{32}, \Phi_{41}, \Phi_{52}, \Phi_{61}, \Phi_{71}, \Phi_{81}, \Phi_{93}\}$$

Idéalement, dans l'exemple donné, l'algorithme génétique produira éventuellement une fonction de transition Φ_n , reproduisant de manière idéale un développement de configurations spatiales observé et connu. Cette fonction idéale pourra alors être utilisé pour prédire les états futurs de l'AC.

L'avantage de la méthode de l'algorithme génétique par rapport aux réseaux neuromimétiques est que les règles « survivantes » du processus de sélection sont compréhensibles au géographe. Leur désavantage est que le voisinage du lieu demeure le même tout au long de l'algorithme – ils seront donc de moindre assistance au géographe cherchant à découvrir la forme relationnelle de l'espace de son phénomène.

10.3 La fonction de transition et l'équifinalité

D'autres méthodes encore existent, ou peuvent être inventées, y compris des méthodes de calibration hybrides, dont un exemple intéressant peut par exemple être observé chez ENGELEN [2002, 2005]. Toutes ont en commun une codification de la fonction de transition d'une façon à ce que celle-ci puisse être calibrée par un algorithme de minimisation des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs observées. Toutes, cependant, sont également exposées au même danger épistémologique que constitue le problème d'*équifinalité* qui apparaît partout là où plusieurs processus distincts peuvent être à l'origine d'une même forme synchronique:

« There is a many to one relationship between the structure of models and the behaviour they produce, so that many models account for the same observed outcome »²⁰

Ainsi, un exemple d'équifinalité peut être tiré même de la mathématique la plus élémentaire où la valeur de 48 peut résulter d'opérations diverses dont $4 \cdot 12$, $6 \cdot 8$, $3 \cdot 16$ etc. En effet, dans un procédé de modélisation dont le but est de créer des fonctions qui, de manière approximative, reproduisent une réalité, il est toujours envisageable de reproduire des formes existantes au sein d'un processus que l'on dira plus tard tout à fait différent de celui ayant « véritablement » mené à la constitution de ces mêmes formes. Lorsqu'une telle « erreur » advient, certains scientifiques disent que le modèle fut expliqué par un *mécanisme compensatoire*²¹. De tels « effets de compensation » apparaissent d'autant plus aisément qu'un système est complexe.

Il est néanmoins important de remarquer que rien n'affirme qu'une telle erreur peut seulement advenir. D'affirmer, en effet, qu'il existe un seul processus « vrai » menant à une forme donnée est difficilement défendable d'un point de vue ontologique et relève pour nous d'un réalisme moniste naïf. La notion d'objectivité que nous avons évoquée dans l'introduction du présent mémoire et qui, à notre avis, s'impose comme la seule valable au sein d'une épistémologie conséquente, permet plusieurs schémas explicatifs, tous valables dans un contexte donné. Une « erreur » ne survient que lorsque le mécanisme trouvé met le scientifique en contradiction avec la réalité géographique: lorsque le géographe remarque une incohérence entre son schéma explicatif et ce qu'il aperçoit du phénomène observé. Cette considération nous amène cependant déjà à la dernière partie de notre mémoire.

²⁰ O'SULLIVAN [2004], 290

²¹ DAUPHINÉ [2003], 162.

IV. Conclusions et perspectives épistémologiques d'une géographie des automates cellulaires

La géographie humaine est une science humaine. De par son affiliation, elle est appelée à se positionner face aux problèmes de l'être-humain: du vivant, de la liberté, du sens et du statut ontologique de l'homme, de ses villes, de son environnement. La géographie humaine, en amont de toute question de gestion ou d'aménagement de l'espace, doit faire face à la question de la liberté de l'humain à créer, à déterminer son espace. Elle doit donc également s'interroger sur les relations de détermination complexes existant entre les individus, les sociétés, et l'environnement physique et ses ressources. En dernier lieu, elle doit toujours s'interroger sur son propre rôle au sein de ces déterminations.

Les notions de dynamique, de complexité et d'émergence que nous avons abordées dans la première partie du présent mémoire nous aident déjà depuis plusieurs années à porter un éclairage sur ces questions. Riches de nos connaissances sur la modélisation par automates cellulaires – acquises dans la partie II et III et qui nous permettent de donner corps à ces notions – nous voulons considérer, dans cette dernière partie, l'apport des automates cellulaires aux questionnements fondamentaux de la géographie humaine.

11 Entre atomisme et holisme: les automates cellulaires et l'inter-détermination des phénomènes de la géographie humaine

Parce que ses schémas explicatifs relient des causes à des effets, toute étude de processus s'inscrit dans une pensée déterministe, ne serait-ce qu'en faisant un usage métaphorique des figures d'une telle pensée. Même en élaborant un modèle stochastique, le géographe invoque des lois – des déterminismes – stochastiques qui façonnent sa compréhension des formes observées.

Pourtant, le déterminisme implicite des modèles de processus dynamiques gêne dans une science comme la géographie humaine – dans une science traitant de l'humain, dit ultimement libre et maître de son destin, capable de reconnaître les conditions de son existence et de les modifier selon sa volonté. Dans un modèle mathématique comme celui des AC, la liberté de l'humain semble tout au mieux réduite à une indifférence de processus aléatoires.

On peut donc comprendre de fortes réticences aux méthodes de modélisation mathématique et informatique qui s'expriment parfois très fortement au sein de la communauté des sciences humaines. Ces réticences, de même que les critiques qui en émanent, sont souvent justifiées, certes – nous n'éprouverions nous même pas le besoin d'esquisser une épistémologie géographique des AC si nous pensions que leur application au sein de notre discipline pouvaient se faire sans critique fondamentale. Par rapport au problème de la liberté, cependant, nous ne pouvons que constater que celle-ci et le déterminisme ne s'excluent pas, comme il apparaît déjà chez SPINOZA¹ et comme est approfondi chez NIETZSCHE². Chez ces deux auteurs, en effet, la question de la liberté se pose en termes de la question de l'identité de celui qui est libre – de l'identité de ce qui est déterminant et de celle de ce qui est déterminé. Tour à tour, et particulièrement chez NIETZSCHE, cette identité peut être assumée par tout Soi, par toute synthèse particulière de la Volonté de Puissance, soit-elle de l'ordre d'une pulsion subconsciente, d'un individu rationnel, d'une discipline scientifique ou d'une culture.

La question géographique de savoir si un individu est déterminé par une société ou si la société est déterminée par la somme des actes des individus, si l'humain détermine son milieu où s'il est déterminé par celui-ci, se voit ainsi réduite à une question de point de vue, à la question du « Soi » qui s'est, ou ne s'est pas³. La liberté, et la détermination qui en émane à l'égard du non-Moi, s'exprime à chaque fois depuis le *point de vue* adopté.

Toutefois, parce que le géographe veut considérer justement les deux points de vue opposés du particulier et du global, et cela dans leur *co*-existence, il se doit de reconnaître *simultanément* leurs deux déterminismes – celui exercé par la globalité sur le particulier *et* celui exercé par chaque particulier sur la globalité. Il ne peut que reconnaître l'**inter-détermination** des deux échelles qu'ils représentent. L'inter-

¹ SPINOZA [1677], V. De Potentia Intellectus, seu de Libertate Humana (V. De la puissance de l'intellect, autrement dit, de la liberté humaine)

² NIETZSCHE [1886], §19: « 'Freiheit des Willens' – das ist das Wort für jenen vielfachen Lust-Zustand des Willens, der befiehlt und sich zugleich mit dem Ausführenden als eins setzt, – der als solcher den Triumph über Widerstände mit genießt, aber bei sich urteilt, sein Wille selbst sei es, der eigentlich die Widerstände überwinde. » Voir également NIETZSCHE [1885], Dritter Teil, « Das andere Tanzlied, §3 ».

³ Cela s'ajoute également aux points soulevés dans le chapitre 5.2.

détermination de l'humain et de son milieu, d'abord, ainsi que l'inter-détermination des phénomènes globaux et locaux. Toute forme d'unilatéralité de cette relation se voit ainsi exclue.

« Nul n'est donc responsable d'une émergence, nul ne peut s'en faire gloire; elle se produit toujours dans l'interstice. »⁴

Un tel interstice n'est autre que la relation – et le résultat de la relation – dialectique entre deux échelles phénoménales distinctes, existant partout là où le co-développement de ces échelles est considéré dans sa dynamique. Faut-il ajouter qu'une telle dialectique n'a bien sûr rien d'hégélien ou de marxiste, vu que, dépourvue de tout τέλος, l'émergence qu'elle anime est parfaitement aveugle?

Quel rapport, dira-t-on, avec une méthode de modélisation mathématique? Celui-ci est pourtant apparent. L'idée fondamentale de la dialectique de l'inter-détermination est parfaitement retrouvée dans le paradigme des AC, sous la forme de l'interaction entre les agents (6.4) et les phénomènes émergents que produit leur comportement collectif. « Des éléments micro émerge le niveau global, qui en retour agit sur le comportement des éléments. »⁵ Si nous considérons, par exemple, le rapport de détermination mutuelle entre les humains et leur milieu physique et social, nous voyons que « les relations hommes nature peuvent être conçues comme une boucle d'interaction. L'homme transforme les milieux physiques, et ces transformations rejaillissent sur les sociétés humaines. »⁶ Pour prendre un exemple concret:

« [Les cités balnéaires] se développent à côté d'un ancien noyau, le long d'une promenade qui s'étire en front de mer. Parallèlement à cette promenade se forme, à l'intérieur, une rue des commerces, la rue d'Antibes à Cannes ou la rue de France à Nice, sur lesquelles se greffent des rues adjacentes et les formes habitées. Ce développement est bien le résultat d'agents en interaction, mais en retour l'espace construit guide l'action de ces agents. Ils sont dans l'obligation de, comme dans un jeu de mécano, de prolonger une tendance ancrée dans l'environnement. »⁷

Dans cet exemple et dans sa simulation par le modèle de percolation (Figure 3a, p. 25), deux points de vue déterminants peuvent être observés. Du *point de vue de la forme*, c'est celle-ci qui s'autodétermine: l'état de l'AC en une itération donnée étant toujours le point de départ dont se développe son état à l'itération d'après. Du *point de vue des lieux*⁸, cependant, la détermination va dans l'autre sens, partant de chacun d'entre eux vers la forme globale. Ce sont en effet les lieux, et non pas la forme globale, qui instancient les règles dynamiques définies d'une façon à ce que la forme globale en émerge (cf. 6.1): C'est eux seuls qui possèdent le potentiel de devenir occupés ou inoccupés, de participer ou de ne pas participer à l'espace construit d'une ville. Si, cependant, la forme globale, émergente dans la simulation du modèle de percolation, ne grandit pas jusqu'à la proximité d'un lieu, celui-ci ne réalisera jamais son potentiel d'être occupé. Le rapport de détermination opérant ainsi dans les deux sens, nous avons une inter-détermination entre la structure urbaine et les éléments constituant son prolongement.

⁴ FOUCAULT [1971], 1012.

⁵ DAUPHINÉ [2003], 51.

⁶ DAUPHINÉ [2003], 27.

⁷ DAUPHINÉ [2003], 208.

⁸ Ces lieux peuvent, dans le modèle de percolation, être considérés comme les agents du modèle. La présence effective d'agents humains n'y est qu'implicite.

Un exemple plus évident d'une telle inter-détermination peut être observé dans tout modèle multiscalaire, où le contexte structurel peut être conçu comme occupant une échelle – voir une dimension – à part (*cf.* 7.3, 9.2). Admettons, par exemple, que l'intolérance mutuelle de deux populations soit inversement proportionnelle à leur taux d'exposition mutuel. Prenons, d'autre part, un modèle de ségrégation basé sur le modèle de Schelling, où l'intolérance s'exprime par un « seuil de tolérance » qui, si dépassé, pousse un ménage – occupant un lieu – à déménager en un autre lieu d'une ville, modélisée par un espace cellulaire donné⁹. Nous pouvons alors déterminer deux échelles du phénomène de ségrégation. La première contiendra l'ensemble des lieux représentant des parcelles occupables par des ménages de l'une ou de l'autre population. La deuxième échelle contiendra un seul lieu, possédant lui-même un seul prédicat, dont la valeur instancie l'indice de ségrégation global. La valeur de ce prédicat, dira-t-on, sera donc entièrement déterminée par la disposition des ménages au sein de l'espace, à l'échelle des ménages. Cela est vrai. Dans l'autre sens, cependant, le taux de ségrégation global, instancié par la valeur de ce même prédicat, déterminera le seuil de tolérance de chacun des ménages, entraînant des configurations futures de l'espace à l'origine d'autres taux de ségrégation.

À présent, si nous regardons un ménage particulier de ce modèle, est-il à l'origine de son intolérance par rapport à ses voisins, ou cette intolérance est-elle déterminée par l'indice de ségrégation global? À nouveau, ni l'un ni l'autre. Car le phénomène de ségrégation d'une ville est, dans ce modèle, un phénomène dialectique d'inter-détermination de deux échelles phénoménales distinctes.

Nous voyons ainsi que dans un modèle cellulaire, les individus et leur contexte structurel n'ont plus besoin de se voir assigner des rôles de déterminants unilatéraux. Ils peuvent être considérés *à la fois* comme causes et résultats, *à la fois* comme agissants et subissants, en fonction du point de vue d'une échelle ou d'une dimension particulière d'un même phénomène. Parce qu'il n'exclut ainsi en rien un tel rapport d'inter-détermination, parce que, dirons-nous même, il le rend apparent, nous pensons que le modèle cellulaire constitue une issue à l'opposition entre le holisme et l'individualisme qui, depuis longtemps, hante l'épistémologie de la géographie humaine et des sciences humaines en général. Dans son rôle d'interface entre ces deux perspectives, ce rapport d'inter-détermination nous renvoie par ailleurs à la fondamentale indiscernabilité de l'Un et du Multiple, que nous avons évoquée dans le chapitre 3.

12 Les automates cellulaires et le « comprendre » en géographie

Parmi les paradigmes épistémologiques amenés par les AC, un des plus intéressants est certainement celui baptisé science sociale « générative ». Nous trouvons une expression de ce paradigme chez EPSTEIN et AXTELL [1995], dans leur ouvrage sur le modèle « Sugarscape » qui a fait date au sein de la recherche en simulation pour les sciences humaines:

⁹ *cf.* Figure 2, SCHELLING [1972, 1979], ainsi que OUREDNIK [2005].

« Perhaps one day people will interpret the question, “Can you explain it?” as asking “Can you *grow* it?” Artificial society modeling allows us to “grow” social structures *in silico* demonstrating that certain sets of microspecifications are *sufficient to generate* the macrophenomena of interest. Indeed, it holds out the prospect of a new, *generative*, kind of social science. »¹⁰

Notons peut-être d'abord que l'adoption de l'approche générative évoquée dans ce passage, plutôt que de s'ouvrir sur un futur probable de l'épistémologie des sciences humaines, renoue plutôt avec la gnoséologie antique d'ARISTOTE. En effet, dans une science générative, savoir redevient un acte¹¹. Nous n'en adhérons pour autant que plus à sa perspective. La simulation conçue comme une science générative, comme un acte de savoir, constitue à nos yeux l'apport le plus important des AC à la géographie – un apport auquel nous reviendrons plus en détail dans le chapitre suivant.

Ce à quoi il nous paraît toutefois plus difficile d'adhérer, dans la proposition d'EPSTEIN et AXTELL, est l'accent – soit-il involontaire – sur la notion d'*explication*. En effet, dans le contexte d'une science humaine comme la géographie, plutôt que de nous aider à *expliquer* un phénomène, nous voudrions que le modèle cellulaire nous aide à le *comprendre*.

Car que veut dire « expliquer »? Expliquer revient à concevoir la nature d'un phénomène en termes de sa fonction – de son but – ultime ou en termes du mécanisme qui l'aurait engendré. La première position, téléonomique, étant exclue dans le contexte cellulaire que nous avons jusqu'ici examiné, expliquer revient, dans notre cas, à concevoir un phénomène en termes de sa genèse. Le schéma explicatif génétique que cela nous amène à créer n'est certainement pas dépourvu de valeur. Il permet de reconnaître dans le phénomène une structure dynamique, de le concevoir *dans le temps*. C'est d'ailleurs à la création d'un tel schéma qu'aspire toute science générative. Toute science générative *n'explique pas* pour autant. Car « expliquer » veut dire plus que concevoir – expliquer signifie énoncer ce que le phénomène *est*, dans sa globalité, l'enfermer dans une structure causale, ne laissant ontologiquement subsister que ce qui fait partie de cette structure. Et c'est précisément dans ce mouvement que la science se perd dans son objet, qu'un prédicat particulier du phénomène est élevé au rang de son essence et que le monde se referme.

Évidemment, la notion d'explication ne se réduit pas toujours à cette connotation. En géographie, HARVEY [1969] présente plusieurs notions d'explication allant de la forme décrite ci haut jusqu'à l'explication comme analogie, dans lequel les structures explicatives formulées ne sont que métaphores permettant de donner un sens au phénomène – l'explication, alors, n'est qu'un phénomène émergent entre le Moi du géographe et la réalité, face à laquelle il se voit confronté (*cf.* partie I). Un tel sens de la notion d'« explication » se rapproche évidemment de notre façon de saisir le rôle de la modélisation. Cependant, l'évolution sémantique actuelle du terme « explication » d'une part, sa polysémie oscillant entre des positions épistémiques diamétralement opposées de l'autre, nous contraint à rejeter le terme comme inadéquat dans le cadre de la géographie humaine.

Le « comprendre », de son côté, permet de cibler une attitude épistémique particulière, probablement plus proche de la notion d'explication par analogie. Car le mouvement du comprendre n'est pas celui de l'énoncé de lois causales mais celui de

¹⁰ EPSTEIN, AXTELL [1996].

¹¹ Voir: ARISTOTE, Métaphysique, IX, 1051a.

l'intériorisation. Le comprendre relève d'une herméneutique au sein de laquelle l'objet de la recherche est appréhendé au travers d'une structure de sens, toujours présente car constituée par – et constituant – l'évolution même d'un individu particulier ou d'une science. Lorsque le géographe cherche à comprendre, il cherche une *manière de saisir* un phénomène, il cherche à lui donner un sens – un sens pouvant être intégré dans le savoir, l'expérience qu'il a de son monde. La structure dynamique du phénomène ne le détermine alors pas, elle l'articule à l'ici et au maintenant – au passé accumulé dans la mémoire de son observateur¹². Et l'observateur, ici, est la géographie elle-même – la géographie en tant qu'ensemble articulé de notions, de questions et d'attentes émises par les géographes passés et transmis aux étudiants et géographes futurs.¹³ C'est au travers de cet ensemble que le géographe jugera une observation mais c'est également dans cet ensemble qu'il l'intériorisera, modifiant la structure même de sa discipline.

Ce que nous voulons mettre en avant par ces considérations est le danger que constitue tout AC lorsque compris comme *explication* d'un phénomène géographique. La forclusion ainsi commise – de manière, par ailleurs, bien plus idéologique que scientifique – fût-elle généralisée, s'avèrerait tout à fait fatale à l'humain et à son monde.

En employant les AC comme modèles de phénomènes géographiques, éviter ce piège semble d'autant plus difficile que la représentation dynamique de ces phénomènes est de nature d'emblée causale. La structure même du modèle, demandera-t-on, ne relève-t-elle pas d'un schéma explicatif? Oui, cela est vrai, mais le fort du modèle cellulaire dynamique est justement d'être un schéma – ou, plus précisément, une métaphore spatiotemporelle d'un phénomène observé. Et en tant que constitution d'une telle métaphore, en tant que *trans-formation d'un phénomène géographique en une forme dynamique signifiante*, la création d'un modèle cellulaire relève pleinement d'un procédé du « comprendre ».

13 L'empirie de la raison comme renaissance d'une géographie explorative

L'une des critiques les plus virulentes à l'égard des modèles basés agents, et des modèles informatiques en général, consiste à relever leur caractère irréaliste. Quelque soit l'effort noétique (*cf.* 8) investi par le géographe à produire des entités formelles aussi adéquates que possible au phénomène géographique observé, quelque soient les avantages de l'expérimentation *in silico* d'un système social, le fait demeure, dira-t-on, que « les sujets expérimentaux sont des modèles, pas le monde lui-même. »¹⁴

« Indeed, one might say that von Neumann's is a model of “life only” in the same sense as chess is a model of “war”: a board game that qualitatively captures certain essential feedback loops of a certain situation. »¹⁵

L'analogie de la critique est correcte, ainsi que la conclusion – le modèle cellulaire d'un phénomène géographique ne relève qu'un certain aspect du phénomène, il ne lui

¹² Voir p. ex. DILTHEY [1910], APEL [1979] ou GRAESER [1989].

¹³ *cf.* HARVEY [1969], 12.

¹⁴ « the experimental subjects are models, not the world itself »: O'SULLIVAN [2004], 288 rejoignant la critique de SAYER [1976].

¹⁵ TOFFOLI [1994], 2.

donne qu'un certain sens, parmi un nombre innombrable de sens qui peuvent lui être donnés. Cela est-il pour autant un défaut?

Cela l'est certainement si l'on présuppose qu'il n'existe qu'un seul schéma explicatif, que ce que l'on appelle parfois « réalité objective » possède un sens unique, vrai et absolu qui reste seulement à découvrir, à atteindre au sein d'une interrogation qui, nécessairement, y converge. Avec ce que nous avons relevé maintes fois déjà au long du présent mémoire, une telle présupposition ne peut évidemment pas tenir.

Elle ne peut tenir non seulement par ce qu'elle obstrue le fait que tout modèle est une description *délibérément* schématique d'un phénomène. Elle ne peut tenir surtout parce qu'elle oublie qu'un modèle, loin d'être un simple reflet, *participe* au phénomène qu'il modélise. Elle oublie que la réalité n'est phénomène, qu'elle n'apparaît¹⁶, qu'*en tant que* modèle, soit-il dynamique, poétique, cartographique...

La relation du modèle au phénomène n'est pas unilatérale, bien sûr – le géographe ne façonne pas une réalité, il l'amène à apparaître *en tant que* géographique. Cette réalité est toutefois multiple. Son sens ne converge pas, il évolue, éclate, disparaît et renaît encore.

Chaque modèle, chaque sens donné à la réalité a sa propre existence, sa propre structure, ses propres exigences d'auto-cohérence. Une image n'est pas un récit et un récit n'est pas un poème. De même, le modèle cellulaire, en tant même que métaphore, a ses propres règles, sa propre façon de participer au phénomène géographique.

Cette façon, nous l'avons déjà suggérée dans le chapitre 8, lorsque nous faisons apparaître le géographe en tant que « démiurge étonné ». Par ce terme, que nous n'avons aucunement choisi par hasard, nous voulons mettre en avant le caractère *imprévisible* du champ théorique ouvert par tout géographe formulant un modèle dynamique du type cellulaire. Car ce qui est posé comme théorie dans un AC, nous l'avons vu, consiste en un ensemble d'états, associés à des lieux et reliés entre eux par une fonction de transition. La particularité épistémologique des AC tient dans le fait que cette théorie ne prend corps que dans la simulation du modèle – une simulation toujours imprévisible à long terme.

La construction du modèle et la participation de celui-ci au phénomène géographique atteint ainsi un nouveau niveau: prolongé dans la temporalité simulée de la machine, le phénomène géographique transcende les limites de prévisibilité logique formulable par le cerveau humain. En ce sens, la simulation d'un AC, conçu de manière spatiale, est la prolongation rigoureusement géométrique, dans l'espace et dans le temps, d'une mise en forme géographique de la réalité, entamée et formellement explicitée par le géographe.

De nombreux chercheurs, déjà, ont constaté cette particularité des modèles dynamiques et des AC en particulier. Ainsi par exemple O'SULLIVAN:

« It may [] be useful to think of complex geographic models as extensions of thought experiments, where the necessary and contingent implications of theories can be examined. »¹⁷

Ou encore ETXEBERRIA et ÍBAÑEZ:

« It is interesting to build computational models of complex systems [] in which the formal consequences of a set of axioms can be explored. The appeal of this is to study

¹⁶ Le « phénomène » n'est autre que « ce qui apparaît » – *fainomenenon* vient de *φαινεται*, « apparaître ».

¹⁷ O'SULLIVAN [2004], 291.

the hypothetical – including contrafactual – situations, even if they are far from the observed facts of the real world, because they can open a new theory »¹⁸

DOWLING [1999] consacre même à cette particularité, et à la démarche qui en procède, un article baptisé « Experimenting on theories ». L'avantage toujours relevé par ceux qui évoquent cette démarche est la rigueur et le caractère explicite que nous avons soulevés plus haut.

La rigueur, elle, est directement liée à l'expression mathématique et algorithmique du modèle, ainsi qu'à son implémentabilité dans la machine, rendue possible par les deux premières caractéristiques:

« L'immense mérite des modèles informatiques est que tout aspect des phénomènes auxquels leur exécution donne lieu peut être enregistré, reproduit, examiné sous toutes les coutures, dans les moindres détails, et ce aussi souvent que le souhaite un observateur. Les données produites peuvent en outre être traitées par l'outil informatique lui-même de façon à être présentées sous la forme la plus propice à leur dépouillement »¹⁹

Le caractère explicite du modèle, lui, fait que rien de ce qui sous-tend un phénomène émergent, obtenu dans la simulation, n'entre dans le champ d'une spéculation métaphysique – comme note DENNETT [1991], « il n'y a pas d'arrière-scène; il n'y a pas de variables cachées. »²⁰ Cela fait de la modélisation par AC une démarche authentiquement *déductive*. Que cela permet-il? La déduction ne peut, dira-t-on, « *prouver* en soi quoi que ce soit de ce que nous ne saurions déjà »²¹. Évidemment, toute déduction est précédée d'une inférence inductive. La déduction, cependant, est ce qui donne son sens au savoir. Si l'induction permet de réduire la multitude d'un phénomène à une proposition simple, seule la déduction permet de générer un sens de cette proposition en lui donnant suite – suite logique et dynamique. En générant un déploiement, dans le temps, des conséquences logiques de propositions et théories obtenues par l'inférence inductive, la simulation d'un AC nous permet de *comprendre* ce que nous savons, de *donner lieu* à ce que nous ne savons, en fait, que de manière potentielle.

À ce titre, il est bon de se rappeler de ce que C. G. JUNG disait déjà en 1954 au sujet des objectivations des dynamiques naturelles:

« Alle mythisierten Naturvorgänge, wie Sommer und Winter, Mondwechsel, Regenzeiten usw., sind nichts weniger als Allegorien* eben dieser objektiven Erfahrung, sondern vielmehr symbolische Ausdrücke für das innere und unbewusste Drama der Seele, welches auf dem Wege der Projektion, das heisst gespiegelt in den Naturereignissen, dem menschlichen Bewusstsein fassbar wird.

[*Allegorie ist eine Paraphrasierung eines bewussten Inhaltes, Symbol dagegen ein bestmöglicher Ausdruck für einen erst geahnten, aber noch unerkannten, unbewussten Inhalt] »²²

Nous percevons, à la lumière de cette considération, à quel point la structuration dans un processus objectivé, dans un « symbole dynamique », fait intégralement partie de

¹⁸ ETXEBERRIA, IBAÑEZ [1999], 317.

¹⁹ SIGAUD [2004], 50.

²⁰ « There is no backstage; there are no hidden variables ».

²¹ « [...] deduction, by itself, cannot prove anything which we do not already know. »: HARVEY [1969], 37.

²² JUNG [1954], 16. Entre crochets se trouve la note de bas de page de JUNG concernant l'allégorie. Cf. BINSWANGER [1947], 76.

ce que nous appelons connaissance de soi; connaissance, dans notre cas, que possède la géographie de soi-même et de ses propres concepts.

Ce qui est accompli ainsi, dans la simulation d'un AC, n'est autre qu'une *expérimentation empirique des structures rationnelles* produites par le géographe et la géographie. Ce que rend donc possible un AC, en tant que modèle dynamique basé agents, est une véritable **empirie de la raison** – une possibilité défiant un clivage des mieux établis par le passé dans la pensée occidentale.

Dans une telle empirie de la raison ne retrouve-t-on pas, finalement, une géographie de l'exploration, ainsi qu'elle était pratiquée aux temps fondateurs d'Alexander von HUMBOLDT? Une géographie dont tout géographe d'aujourd'hui porte l'héritage, nostalgiquement, peut-être, mais dont l'élan semble encore suffisamment fort pour lui permettre de porter un regard curieux, un regard de chercheur, sur un monde post-moderne où plus rien ne serait à découvrir et tout à gérer? L'avancée technologique de la modernité a certes refermé, en les exposant, les territoires inconnus du passé, mais ne s'ouvre-t-elle pas, elle même, sur d'autres inconnus encore, tracés en elle comme les prolongements d'une raison qui, en fin de compte – et heureusement – ne *se* connaît pas?

Les AC, en tant que modèles complexes et dynamiques, nous permettent d'étudier nos propres concepts, nos propres théories portant sur le monde. Ils nous permettent d'explorer ces concepts et théories jusqu'à leurs dernières conséquences en donnant lieu à leur déploiement au sein du territoire inconnu de la simulation. Se pourrait-il que leur apport le plus central et le plus essentiel à la discipline géographique réside précisément en cela?

14 Les automates cellulaires, la géographie humaine et l'espace comme métaphore

Quelle est, considérant rétrospectivement ce qui fut présenté dans ce mémoire, l'élément central qui lie la géographie humaine et les automates cellulaires? Ce lien n'est certainement pas incarné au mieux par les éléments constitutants. En effet, dans une géographie plus littéraire, comme, par exemple, dans l'œuvre de Jean-Bernard RACINE ou d'Augustin BERQUE, les phénomènes géographiques se donnent à nous dans un ensemble de catégories tout à fait différent des lieux, états et fonctions de transition que nous avons défini.

Ce n'est pas non plus dans l'espace bidimensionnel de la cartographie officielle et classique²³ que se rencontrent la méthode ci présentée et la discipline géographique. En maints passages de notre mémoire, nous avons en effet démontré l'indépendance du fonctionnement des AC par rapport à tout espace, et particulièrement par rapport à cet espace-ci.

Non, ce qui apparaît comme dénominateur commun central, comme lien le plus solide entre les AC et la géographie est la *métaphore spatiale* elle-même. Car c'est précisément au sein de cette métaphore que, aujourd'hui, les AC est la géographie font preuve d'une dépendance mutuelle. Car qu'accomplit cette métaphore? Cette métaphore structure le rapport même de l'être humain à une réalité ouverte, lui

²³ Celle de la carte topographique nationale, par exemple.

apparaissant perpétuellement au fur à mesure qu'il l'investit de ses sentiments et intentions. Cette métaphore donne, ainsi que nous l'avons vu dans le chapitre 6.3, un sens à un ensemble de faits objectivés dans cette relation intentionnelle au monde. Et cet ensemble de faits est d'abord, d'un point de vue géographique, un ensemble de lieux organisés au sein d'une topologie (8), inscriptible dans un espace signifiant; souvent euclidien et bidimensionnel, certes, par les contraintes du graphisme et par tradition (9.3).

La signification de cet espace renvoie à des liens existant entre les lieux représentés – des liens, des relations de détermination d'autant plus forts que les lieux y sont proches. Cette représentation, cependant, ne constitue que la forme de ces liens, elle n'est, pour ainsi dire, qu'une tranche synchronique de l'espace-temps. La signification de la métaphore s'en voit incomplète. Ce que permettent les AC est justement de donner à cette métaphore incomplète, à cette tranche synchronique signifiante, la dimension temporelle dans laquelle, seulement, les relations de détermination qu'elle symbolise renvoient à des signifiés concrets: telle relation de détermination sera d'incrémenter la valeur du prédicat « population », telle autre déterminera la valeur du prédicat « terrain bâti » comme VRAI (*cf.* 6.2). Les AC donnent, ainsi, sa plénitude sémantique à la métaphore spatiale, issue de la pensée géographique.

De leur côté, les AC, qui consistent uniquement en un ensemble de lieux, dont les prédicats sont ou ne sont pas, selon les cas, mis en relation par une fonction de transition, ont besoin d'une structure où ces relations peuvent devenir apparentes à la compréhension humaine. Et la structure qui semble être la plus à même de permettre cette compréhension est justement celle de la métaphore spatiale, propre à la pensée géographique.

Le fait que la majorité des AC soit d'emblée représentée dans un espace ne renvoie pas, donc, à une spatialité qui leur serait intrinsèque mais à une spatialité héritée de la pensée géographique. Ainsi lorsque la géographie se saisit de tel ou tel modèle cellulaire déjà représenté dans l'espace, elle ne se retrouve que soi-même dans un modèle auquel elle a, probablement involontairement, déjà prêté sa pensée. L'adéquation du modèle cellulaire à la géographie *s'impose* donc, pour ainsi dire, par une ironique boucle de rétroaction.

15 En guise de conclusion: les aléas d'une méthode

Le rôle majeur d'une épistémologie est de formuler et de justifier une méthode par laquelle le scientifique accède à ce qu'il étudie. Voyons donc, en guise de conclusion du présent mémoire, quelles sont les tâches du géographe voulant se servir d'un automate cellulaire afin de modéliser une réalité donnée de manière adéquate à sa discipline?

Dans le chapitre 8, nous avons vu qu'il doit d'abord objectiver un ensemble de lieux (6.1) et de prédicats (6.2) représentatifs du phénomène donné. Il voudra ensuite mettre ces lieux en relation par une fonction de transition (6.4), afin que leurs prédicats puissent s'influencer de manière mutuelle et donner ainsi lieu à une dynamique simulée du modèle. Afin de connaître ces relations, le géographe devra soit les inférer d'un espace hérité (9.3), ou les chercher, par les méthodes esquissées dans le chapitre 10, à partir d'états successifs du système dynamique observé.

L'AC ainsi défini, il doit être implémenté dans un environnement d'expérimentation. Il doit, à cette fin, non seulement être traduit en un langage de programmation mais également inscrit dans un espace signifiant (9.3), qui, seul, permettra de donner un sens aux résultats obtenus par sa simulation. Il ne s'agit, en effet, pas de faire faire comprendre (12) le phénomène examiné à un computer, mais de mettre le modèle et sa simulation en forme, de transformer sa masse de données opaques en *in*-information effective, signifiante pour un observateur humain.

Tout au long de ce processus, le géographe devra faire des choix judicieux, s'aidant tantôt d'outils ou de concepts hérités de sa discipline, en inventant tantôt de nouveaux. Chacun de ces choix prendra en considération le fait que pas tous les types de cartes conviennent à tel ou tel phénomène, que chaque phénomène a son espace et ses échelles (9.2) qui, à chaque fois, reposent la question de la manière de leur représentation.

Mais la tâche du géographe-modélisateur ne s'arrête pas à la création d'un modèle – cette création, il lui faut l'interpréter, soit-elle la sienne ou celle d'un autre. En tant que, à la fois, géographe et connaisseur de systèmes complexes, il porte la lourde responsabilité de produire des conclusions, des conséquences géographiques des points de vue générés – des conséquences non seulement heuristiques mais également normatives.

Ces conséquences, nous l'avons soulevé dans l'introduction du présent mémoire, peuvent être désastreuses. Si un modèle cellulaire, non pensé jusqu'au bout, en arrivait à affirmer un espace apriorique et absolu (*cf.* 6.3), il affirmerait par là même un mode de domination, lui-même absolu dans ses extrêmes. En effet, comme avertit Beno WERLEN²⁴, le danger de concevoir l'espace comme existant indépendamment des actes humains revient presque automatiquement à adopter comme axiome l'hypothèse évolutionniste de RATZEL, selon laquelle tout être, dans un espace toujours préalablement donné et impassible doit s'adapter ou périr...

Aujourd'hui, alors que les thèses d'auto-organisation sous-jacentes au modèle cellulaire ne peuvent que difficilement aboutir à des conclusions totalitaires de type fasciste, il est d'un autre côté fort aisé de s'imaginer les AC comme serviteurs idéologiques d'un tout autre totalitarisme, probablement tout autant meurtrier dans son aboutissement. Nous avons bien sûr à l'esprit le totalitarisme désincarné du capital.

Car il est vrai que l'espace cellulaire renvoie à une ville facilement divisible en parcelles négociables, équivalentes, interchangeableables – à un espace à la fois homogène et brisé, comme note RACINE [1993], renvoyant à la critique marxiste d'Henri LEFEBVRE. L'espace du capital, l'espace du darwinisme social, avec ses présuppositions mécanistes, est toujours l'espace le plus aisément modélisable. Il n'y a qu'un pas à faire de la conception d'un AC à l'inscription de la ville dans un espace unique – à l'imposition, à cette ville, d'un schéma explicatif (12) emprunté à une biologie qui, depuis bien longtemps, a cessé de parler du βίος.

Afin d'éviter cette régression de l'espace géographique à l'état anorganique de l'échange de flux monétaires et électromagnétiques, le géographe-modélisateur doit donc en tout moment fournir l'effort d'inscrire son modèle dans un concept de la structure spatiale en tant que système signifiant et transcendant, en tant que – dira-t-on métaphoriquement – phénomène entre Dieu et les hommes²⁵. Car tout modèle visant de

²⁴ Intervention au cours du colloque « Penser l'espace », laboratoire ΧΩΡΟΣ, EPFL.

²⁵ *cf.* RACINE [1993] ou BERQUE [1995], 80.

comprendre le rapport de l'humain à son espace, ne peut se soustraire à l'intégration de la dimension transcendante et, par extension, éthique de ce rapport. Cela d'autant plus que ce modèle se proposerait comme formulation d'une pratique aménagiste de l'espace; car « les actes d'aménagement qui ne tiennent pas compte de cette relation éthique de l'être humain à ses lieux [...] aboutissent à produire un monde inhabitable »²⁶.

La transcendance, nous l'avons vu, n'a pas pour aboutissement nécessaire un absolu intemporel: elle ouvre d'abord et surtout la subjectivité de l'Autre (5.2) – une subjectivité qui *peut* être prise en compte dans le modèle cellulaire, dans la mesure où son concepteur se rappelle que chaque lieu est ce qu'il est parce qu'il l'est *pour* un sujet agissant (8, cf. 5.2); qu'à moins d'être pour lui, il est vide de toute signification humaine et ne peut que faire participer son concepteur à l'aliénation du monde. À ce titre, le géographe-modélisateur pensera à une critique encore pertinente, formulée déjà à la fin des années 1970':

« The separation of subject from the object is a characteristic of the anomie of the post-industrial metropolis. Dehumanised urban settings comprise little more than space, little more than geometry; they excite no commitment, they are not for a collectivity. They are the landscape realization of a mode of analysis which has emphasized functional materialism; such analysis translated into a planning paradigm creates a landscape of objective meaning only, without a subject »²⁷

Les AC, eux, peuvent tout autant participer à une telle pièce sans acteurs qu'à la construction d'un espace humain. Il faudra au géographe éviter le piège de la facilité, de la conception d'un « paysage doté d'un sens purement objectif », pour saisir la chance que les AC offrent, pour le peu que l'on veuille la saisir – la chance de concevoir un aménagement du territoire orienté sujet: sujet-individu, sujet-société, sujet en tant qu'il apparaît dans les multiples dimensions du monde, émergeant d'un enchevêtrement de relations interdimensionnelles et interscalaires qui, à la fois, le démultiplient à l'infini et l'unissent à ses multiples « Autres », en un seul sujet-monde (5.1, 7.3, 9.2).

L'aptitude à procéder à une telle *modélisation orientée sujet* ne dépendra évidemment jamais du modèle créé mais de l'aptitude du géographe lui-même à léguer un Soi – une subjectivité – aux objets qu'il modélise. Elle dépendra, en dernière instance, d'une aptitude fondamentalement éthique. Si celle-ci est exercée, si le géographe conçoit, lors même de la modélisation et de l'interprétation, la dimension éthique du modèle cellulaire, c'est-à-dire, s'il est capable de concevoir les objets observés en tant que sujets, alors son modèle parvient déjà à mettre en scène quelque chose de l'ordre d'un monde humain.

Un tel lègue conscient de son αὐτός à l'objet modélisé *engage* bien sûr le géographe. Il l'engage non pas en tant que ce que l'on appelle « scientifique » – compris aujourd'hui fort souvent, hélas, comme vérificateur des vérités aprioriques d'un monde absolu – mais en tant qu'humain.

En amont donc de tous les aspects techniques du modèle, une épistémologie des automates cellulaires ne saurait se soustraire à son rôle d'éthique de la science. Bien plus que d'exiger du géographe une démarche rigoureuse, elle lui demande de *penser*,

²⁶ BERQUE [1995], 80.

²⁷ LEY [1979], 230.

de faire preuve d'un *courage d'être humain*, de reconnaître son modèle pour le sien. Elle exige de lui de ne point se dissimuler derrière un modèle aliéné se proclamant « objectif » mais d'assumer ce modèle en tant que structure de sens objectivée que lui, géographe, propose au monde – comme sens et comme projet.

16 Épilogue: Vers une sémiologie dynamique

Avec l'avènement de modèles dynamiques, dans la mesure où ils permettent de prendre en compte l'individualité et l'intentionnalité singulière des acteurs spatiaux, s'ouvre le champ inespéré d'un outil d'analyse quantitative pour une géographie des perceptions – une géographie se posant la question de « ce que veut dire un monde social pour un acteur, observé au sein de ce monde, et ce que veut dire cet acteur lui-même en agissant dans ce monde »²⁸.

Une telle analyse, idéalement, devrait pouvoir simuler l'espace en tant qu'un système de signes, c'est-à-dire, modéliser la *façon* dont l'espace génère du sens, donnant lieu à l'interaction entre sa syntaxe et sa dynamique, entre ses signifiants et ses êtres vivants, entre ses éléments construits et ses acteurs humains – acteurs dont la multitude d'itinéraires donne à l'espace sa dimension sémanto-pragmatique²⁹.

Étant donné qu'une telle interaction est forcément dialectique, une sémiologie dynamique, émergeant ainsi comme nouvelle discipline de la géographie, se devrait de rendre compte autant de la détermination des actes des acteurs spatiaux par les signes de l'espace, que de la détermination du sens de ces signes par ces mêmes actes.

Peut-être y parviendrait-on, à l'aide d'un automate cellulaire, en définissant un ensemble de lieux-signes, et un ensemble implicite d'agents pouvant être à la fois enseignants, imitateurs, ou déviants, qui reproduirait, tout en le modifiant, le sens des signes par leur comportement.

Mais cela est déjà l'objet d'un autre projet de recherche...

²⁸ « What does this social world mean for the observed actor within this world and what did he mean by his acting within it? »: W. I. THOMAS, cité par LEY [1979], 225.

²⁹ cf. LYRE [2002].

Bibliographie, Annexes et Index

Bibliographie

- ANTONI, J.-P. [2002] *Modélisation de l'étalement urbain : une approche méthodologique*. Faculté de géographie de Strasbourg – Université Louis Pasteur, Laboratoire Image et Ville – UMR 7011. From: <http://www.cybergeographie.presse.fr/ectqg12/antoni/antoni.htm>
- APEL K. O. [1979] *Die Erklären: Verstehen Kontroverse in transzendentalpragmatischer Sicht*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- ARISTOTE [384-322 av. J.C.] *Métaphysique*.
- ARISTOTE [384-322 av. J.C.] *Éthique à Nicomaque*.
- BAVAUD F. [2005] *Sur une classe d'indices et de modèles géographiques invariants par agrégation*. Communiqué au colloque ThéoQuant 2005 à Besançon. From: <http://www.univ-fcomte.fr/theoq>
- BAVAUD F. [2003a] « Module G1: Information Theory and Geography » In: BAVAUD, CHAPPELIER, KOHLAS. (eds.) *Théorie de l'Information*. Université de Lausanne: Documents de cours.
- BAVAUD F. [2003b] *L'autocorrélation spatiale*. Université de Lausanne: Working Paper.
- BENENSON I., TORRENS M. P. [2004] *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- BERNARD G. [1990] « Auto-organisation » In: AUROUX S. (dir.) *Encyclopédie philosophique universelle: Vol. II Les notions philosophiques*. Paris: PUF.
- BERQUE A. [1996] *Être humains sur la terre*. Paris: Gallimard.
- BERQUE A. [1998] « Chorésie » In: *Cahiers de Géographie du Québec*. vol. 42, pp. 437-448.
- BINSWANGER L. [1947] « Traum und Existenz » In: *Ausgewählte Vorträge und Aufsätze*. Bern: Francke Verlag.
- CHAITIN G. J. [1966] « On the Length of Programs for Computing Finite Binary Sequences » In: *Journal of the Association of Computing Machinery*. 13, pp. 547-569.
- CHENCINER A. [2001] *De la Mécanique céleste à la théorie des systèmes dynamiques, aller et retour: Poincaré et la géométrisation de l'espace des phases*. Astronomie et Systèmes Dynamiques, IMCCE, UMR 8028 du CNRS; Département de Mathématiques, Université Paris 7 – Denis Diderot. From: http://www.bdl.fr/Equipes/ASD/preprints/prep.2001/Conf_epis_PoincareLast.2001.pdf
- CHURCH A. [1936] « An unsolvable problem in elementary number theory » In: *American Journal of Mathematics*. 58, 2, (avril 1936), pp. 345-363.
- COCU N., CARUSO G. [2002] *Modéliser la complexité géographique: Vers une approche progressive Automates Cellulaires – Systèmes Multi-Agents*. Department of Geography, Université Catholique de Louvain: Working Paper. May 2004.
- DAUPHINÉ A. [1995] *Chaos, fractales et dynamiques en géographie*. Montpellier: GIP RECLUS Maison de la géographie
- DAUPHINÉ A. [2003] *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris: Anthropos.
- DENNETT D.C. [1991] « Real Patterns » In: *The Journal of Philosophy*, 88(1), pp. 27-51.
- DENNETT D.C. [1995] *Darwin's Dangerous Idea*. New York: Simon & Schuster.
- DILTHEY W. [1910] *Der Aufbau der geschichtlichen Welt in den Geisteswissenschaften*. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1970.
- EDWARDS C. H. [1937] *The historical development of calculus*. New York: Springer-Verlag, 1979.
- ENGELÉN G. [2005] *Spatial simulations with Cellular Automata: recent advances in Geography*. Communiqué au colloque ThéoQuant 2005 à Besançon.
- ENGELÉN G., WHITE R., ULJEE I. [2002] « Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy making » In: TIMMERMANS H. P. J. (dir.) *Decision Support Systems in Urban Planning*. London: E&FN Spon. pp. 125 - 155.

- EPSTEIN J.M., AXTELL R. L. [1996] *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press. (PDF document).
- ESFELD M. [2002] *Einführung in die Naturphilosophie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- ETXEBERRIA A., ÍBAÑEZ J. [1999] « Semiotics of the Artificial: The "Self" of Self-Reproducing Systems in Cellular Automata » In: *Semiotica*. 127(1-4), pp. 295-320.
- EULER L. [1755] « Institutiones calculi differentialis cum eius usu in analysi finitorum ac doctrina serierum » In: *Opera Omnia*. Leipzig. Série 1, Volume 10, 1913.
- FATÈS N. [2001] *Les automates cellulaires: vers une nouvelle épistémologie?* Université Paris I, Sorbonne: Mémoire de DEA en Histoire et Philosophie de Sciences sous la direction de Jean Mosconi.
- FREUD S. [1915] « Triebe und Tribschicksale » In: *Das Ich und das Es: Metapsychologische Schriften*. Frankfurt am Main: Fisher Taschenbuch, 1992.
- GALE S., OLSSON G. (eds.) [1979] *Philosophy in Geography*. Boston: Reidel Publ. Co.
- GILBERT N., TROITZSCH K. G. [1999] *Simulation for the Social Scientist*. Buckingham: Open University Press.
- GOLLEDGE G. R. [1979] « Reality, process, and the dialectical relation between man and environment » In: GALE S., OLSSON G. (eds.) *Philosophy in Geography*. Boston: Reidel Publ. Co. pp. 109-120.
- GOULD P. [1979] « Signals in the noise » In: GALE S., OLSSON G. (eds.) *Philosophy in Geography*. Boston: Reidel Publ. Co. pp. 121-154.
- GRAESER A. [1989] « Das Problem der Hermeneutik – Verstehen und Erklären aus philosophischer Sicht » In: RUSTERHOLZ P., SVILAR M. (eds.) *Verstehen und Erklären*. Berner Universitätsschriften: Paul Haupt.
- GRAVES J. C. [1971] *The Conceptual Foundations of Contemporary Relativity Theory*. Cambridge (Massachusetts): MIT Press.
- HÄGERSTRAND T. [1975] « Space, time and human conditions » In: KARLQVIST A., LUBDQVIST L., SNICKARS F. (eds.) *Dynamic allocation of urban space*. Farnborough: Saxon House, p. 3-12.
- HÄGERSTRAND T. [1970] « What about People in Regional Science? » In: *Papers of the Regional Science Association*. vol. 24, 1970, pp. 7-21.
- HARVEY D. [1969] *Explanation in Geography*. London: Edward Arnold, 2e édition, 1973.
- HEDRICH R. [2002] « Zellulare Automaten: Diskrete Modelle der Welt? » In: *Philosophia naturalis*. 39 (1), pp. 1-24
- HEIDEGGER M. [1954] *Was heisst Denken?* Stuttgart: Reclam, 1992.
- HEIDEGGER M. [1961] *Nietzsche (Band I und II)*. Stuttgart: Neske, 1998.
- HÉRACLITE (D'EPHÈSE) [~520-460 av. J.C.] *Fragments (traduits et commentés par Jean-François Pradeau)*. Paris: Flammarion, 2002.
- HUSSERL E. [1937] *Die Krisis der Europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie*. Haag: Martinus Nijhoff, 1954.
- JUNG C. G. [1954] « Über die Archetypen des Kollektiven Unbewussten » In: JUNG C.G. *Die Archetypen und das kollektive Unbewusste. (Gesammelte Werke, 9/1)*. Zürich: Walter-Verlag. pp. 11-52.
- KITSOPOULOS A. [2004] *Étude sur l'émergence de chemins spontanés dans une cour d'université*. Université de Lausanne, Faculté des Lettres, Section d'Informatique et Méthodes Mathématiques: Projet dans le cadre du 2e certificat, conçu dans le cours « Math III » de Henri Volken, Faculté des Sciences Sociales et Politiques, Institut de Mathématiques Appliquées.
- KOLMOGOROV A. N. [1965] « Three Approaches to the quantitative definition of Information. » In: *Problems of Information Transmission*. 1, pp. 1-17.
- LANGTON, C. G. [1990] « Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation » In: *Physica. D*, 42, pp. 12-37.

- LEIBNIZ G. W. [1714] *La Monadologie*.
- LEIBNIZ G. W. [1849] *Die Mathematischen Schriften*. Berlin: C. I. Gerhard. (Publication posthume).
- LÉVY J., LUSSAULT M. (dirs.) [2003] *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Paris: Belin.
- LEY D. [1979] « Social Geography and the taken-for-granted world » In: GALE S., OLSSON G. (eds.) *Philosophy in Geography*. Boston: Reidel Publ. Co. p. 215-236.
- LORENZ E. N. [1963] « Deterministic Nonperiodic Flow » In: *Journal of Atmospheric Sciences*. Vol. 20, 130, 1963.
- LYRE H. [2002] *Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung*. München: Fink.
- MAGNANI L. [2001] *Philosophy and Geometry: Theoretical and Historical Issues*. Dodrecht: Kluwer Academic Publishers.
- MARCHAL B. [1990] « Automate » In: AUROUX S. (dir.) *Encyclopédie philosophique universelle: Vol. II Les notions philosophiques*. Paris: PUF.
- MARCHAND B. [1979] « Dialectics in Geography » In: GALE S., OLSSON G. (eds.) *Philosophy in Geography*. Boston: Reidel Publ. Co. p. 379-386.
- MATURANA H. R., VARELA F. J. [1972] *De máquinas y Seres Vivos*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- MATURANA H. R., VARELA F. J. [1973] *Autopoiesis and cognition : the realization of the living (traduction de « De máquinas y seres vivos »)*.
- NEUMANN J. VON [1951] « The General and Logical Theory of Automata » In: JEFFRIES L. A. (ed.) *Cerebral mechanisms in Behaviour*. The Hixon Symposium: New York.
- NEUMANN J. VON [1966] (Edited and completed by BURKS A. W.) *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press.
- NIETZSCHE F. [1885] *Also sprach Zarathustra: Ein Buch für Alle und Keinen*. Insel Taschenbuch, 1976.
- NIETZSCHE F. [1886] *Jenseits von Gut und Böse: Vorspiel einer Philosophie der Zukunft*. Goldmann Verlag.
- OLLIGSCHLAEGER A., GORR W. [1997] *Spatio-Temporal Forecasting of Crime: Application of Classical and Neural Network Models*. Carnegie Mellon University: Working Paper.
- O'SULLIVAN D. [2004] « Complexity science and human geography » In: *Transactions of the institute of british geographers*. 29 (3): 282-295 SEP 2004.
- OUREDNIK A. [2003] *La Topomorphose*. Université de Lausanne, Institut de Géographie: Dossier d'examen de 2e certificat. From: <http://ourednik.info>
- OUREDNIK A. [2004a] « Midwest, cet hiver: un récit de voyage » In: *L'Irrégulier: journal de la Faculté des Géosciences et de l'Environnement*. Lausanne. no. 6, 2004. From: <http://www2.unil.ch/irregulier>
- OUREDNIK A. [2004b] *Métaphysique, ontologie, et épistémologie des automates cellulaires*. Université de Lausanne, Faculté des Lettres, Section de Philosophie: Essai dans le cadre du 2e certificat. From: <http://ourednik.info>
- OUREDNIK A. [2004c] « Rapport d'herméneutique minérale » In: *Αρχαί*. Lausanne. no. 10.
- PARMÉNIDE [515-440 av. J.C.] *Le poème: Fragments (texte grec, traduction, présentation et commentaire par Marcel Conche)*. Paris: PUF, 1996.
- PHIPPS M., LANGLOIS A. [1997] *Automates cellulaires, applications à la simulation urbaine*. Paris: Hermes.
- POINCARÉ H. [1892] *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*. Paris: Gauthier-Villars, 3 vol., 1892-99.
- POINCARÉ H. [1895] « L'espace et la géométrie » In: *Revue de métaphysique et de morale*. Troisième année (1895), pp. 631-646. (PDF) From: <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/philo/textesph/default.htm>

- PRETECEILLE E. [1995] « Ségrégations Urbaines » PRETECEILLE E., PUDAL B. (ed.) « *Ségrégations Urbaines* », *Sociétés Contemporaines*. No. 22/23 Juin/Sept 1995.
- PUMAIN D., SANDERS L., SAINT-JULIEN T. [1989] *Villes et autoorganisation*. Paris: Economica.
- RACINE J.B. [1993] *La ville entre Dieu et les hommes*. Genève: Presses Bibliques et Universitaires.
- RENNARD J.-P. [2000] *Introduction aux Automates Cellulaires*. From: <http://www.rennard.org/alife/french/actxt/ac.html>
- SANDERS L., PUMAIN D., MATHIAN H., GUÉRIN-PACE F., BURA S. [1997] « SIMPOP: a multi-agent system for the study of urbanism » In: *Environment and Planning B*. 24, 287-305.
- SCHELLING T. C. [1969] "Models of Segregation (in Strategic Theory and Its Applications)" In: *American Economic Review: Papers and Proceedings*. 59(2), May, pp. 488-493.
- SCHELLING T. C. [1971] "Dynamic Models of Segregation" In: *Journal of mathematical sociology*. 1(2), pp. 143-186.
- SCHELLING T. C. [1978] *Micromotives and Macrobehavior*. New York, London: Norton.
- SHANNON C. E., WEAVER W. [1963] *The Mathematical Theory of Communication*. Chicago: University of Illinois Press.
- SIGAUD O. [2002] *Automatisme et subjectivité : l'anticipation au coeur de l'expérience*. L'UNIVERSITÉ PARIS 1: Thèse de Doctorat soutenue le 10 décembre 2002. From: <http://animatlab.lip6.fr/Sigaud/>
- SOLOMONOFF R. J. [1964] « A Formal theory of Inductive Inference » In: *Information and Control*. 7, 1-22, 224-54.
- SPINOZA [1677] *Ethica ordine geometrico demonstrata (L'Éthique démontrée selon le lois géométriques)*.
- TOBLER W. R. [1979] « Cellular Geography » In: GALE S., OLSSON G. (eds.) *Philosophy in Geography*. Boston: Reidel Publ. Co. p. 379-386.
- TOFFOLI T. [1994] « Occam, Turing, von Neumann, Jaynes: How much can you get for how little? (A conceptual introduction to cellular automata) » In: *InterJournal*. Dec. 1994.
- TURCO A. [1997] « Aménagement et processus territoriaux: l'enjeu sémiologique » In: *Les langages de la rue*. Paris: L'Harmattan. 90-91, 3-4/1997, pp. 231-249.
- WEHR M. [2003] *Der Schmetterlingsdefekt: Turbulenzen in der Chaostheorie*. Klett-Cotta.
- WEIMAR J. R. [2000] *Modelling with Cellular Automata*. Technical University Braunschweig, Institute for Scientific Computation: Habilitations-Schrift. From: <http://www.jweimar.de/jcasim/main>
- WILENSKY U. [1999] *NetLogo*. Northwestern University, Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. From: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>
- WOLFRAM S. [2002] *A New Kind of Science*. Wolfram Media.
- ZEIGLER B. P. [1990] « Cellular Space Models: New Foundations for Simulation and Science » In: SALMON, M. H. (ed.) *The Philosophy of Logical Mechanism: Essays in Honor of Arthur W. Burks*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 41-64.

Annexes

Logiciels recommandés pour l'exploration des automates cellulaires

CELLULAR AUTOMATA VIEWER. Jean-Philippe Rennard. <http://www.rennard.org/alife>

MATHEMATICA. Wolfram Research Inc. <http://www.mathematica.com>

MIREK'S JAVA CELEBRATION. Mirek Wojtowicz. <http://www.mirwoj.opus.chelm.pl>

NETLOGO. The Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Chicago. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

STARLOGO. Prédecesseur de NetLogo, avec certaines fonctionnalités de dessin graphique qui ont été supprimées dans les versions ultérieures.

NKS EXPLORER. Wolfram.

Résumé des Notations

Notations générales

$a \in A$ a est élément d'un ensemble A .

$A \subseteq B$ A est un sous-ensemble de B .

$c := D$ c est défini comme D , où D est généralement une expression ou une fonction de c .

$B(a)$ B est un prédicat de a . C'est-à-dire, le sujet a possède la propriété d'être B .

$\forall a(B(a))$ Usage du **quantificateur universel**: « Tous les a possèdent la propriété B ».

$\exists a(B(a))$ Usage du **quantificateur existentiel**: « Il existe un a qui possède la propriété B ».

\mathbb{R} Ensemble des nombres réels.

\mathbb{Z} Ensemble des nombres entiers.

\mathbb{R}^n **Espace euclidien** à n dimensions. Pour tout $n \in \mathbb{Z}$, un espace euclidien n -dimensionnel est le set \mathbb{R}^n au sein duquel toute distance entre deux points (x_1, \dots, x_n) et (y_1, \dots, y_n) correspond à la **métrique euclidienne** calculable selon le théorème de Pythagore et pouvant être exprimée comme:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Remarquons qu'un système de coordonnées localisant chaque point dans l'espace euclidien à deux dimensions ne fut conçu qu'en 1637 par DESCARTES. Ce n'est d'ailleurs qu'à partir du 19^e siècle que l'on a introduit les coordonnées de dimensions supplémentaires.

\mathbb{Z}^n **Espace euclidien discret** à n dimensions.

Notations particulières à ce mémoire**Éléments:**

X	L' ensemble des lieux d'un automate cellulaire.
x_i	Un lieu $x_i \in X$ particulier.
$H(x_i)$	L'ensemble de tous les prédicats définissant l' état d'un lieu . $H(x_i) = \{\eta_1(x_i), \eta_1(x_i), \dots, \eta_{n-1}(x_i), \eta_n(x_i)\}$ où n est le nombre de prédicats particuliers que possède x_i .
$\eta_a(x_i)$	Un prédicat particulier d'un lieu. $\eta_a(x_i) \in H(x_i)$.
$\eta_a(X)$	$\eta_a(X) = \{\eta_a(x_1), \eta_a(x_1), \dots, \eta_a(x_{n-1}), \eta_a(x_n)\}$.
$H(X)$	L' état de l'automate cellulaire , donné par la matrice suivante (où m correspond au nombre de lieux et où n correspond au nombre de prédicats applicables à chaque lieu x_i):
$\begin{pmatrix} \eta_1(x_1) & \eta_2(x_1) & \dots & \eta_{n-1}(x_1) & \eta_n(x_1) \\ \eta_1(x_2) & \eta_2(x_2) & \dots & \eta_{n-1}(x_2) & \eta_n(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_1(x_{m-1}) & \eta_2(x_{m-1}) & \dots & \eta_{n-1}(x_{m-1}) & \eta_n(x_{m-1}) \\ \eta_1(x_m) & \eta_2(x_m) & \dots & \eta_{n-1}(x_m) & \eta_n(x_m) \end{pmatrix}$	
Φ	Une fonction de transition .
φ	Une règle de transition particulière. $\varphi \in \Phi$.
T	Le temps, contenant l' ensemble de toutes les itérations dans lesquelles opère l'automate cellulaire. $T = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_\infty\}$.
t_i	Une itération particulière dans laquelle peut se trouver l'automate cellulaire.
$\Psi(x_i)$	Ensemble des lieux voisins de x_i .

Relations et règles:

$\eta_a(x_i, t_j) \rightarrow \eta_b(x_k, t_l)$	Relation de détermination: $\eta_a(x_i, t_j)$ détermine $\eta_b(x_k, t_l)$.
$\eta_a(x_i, t_j) \xrightarrow{\alpha} \eta_b(x_k, t_l)$	Relation de détermination stochastique: $\eta_a(x_i, t_j)$ détermine $\eta_b(x_k, t_l)$ avec une probabilité α . En l'absence d'autres indications on sous-entend que $\eta_b(x_k, t_l)$ est déterminé par $\eta_b(x_k, t_{l-1})$ avec une probabilité $1-\alpha$.
$\eta_a(x_i, t_j) = A \rightarrow \eta_b(x_k, t_l) = B$	Règle de transition conditionnelle. Si la condition du côté gauche est remplie en un temps t_i , l'expression du côté droit est déterminée comme vraie en un temps t_j .

$$\eta_a(x_i, t_j) = A \xrightarrow{\alpha} \eta_b(x_k, t_l) = B$$

Règle de transition conditionnelle stochastique. Si la condition du côté gauche est remplie en un temps t_i , l'expression du côté droit est déterminée avec une probabilité α comme vraie en un temps t_j . Si $\eta_b(x_k, t_l)$ est autrement indéterminé, on sous-entend que $\eta_b(x_k, t_l) = \eta_b(x_k, t_{l-1})$ avec une probabilité $1-\alpha$.

$$\# \eta_b(x_k, t_l) = f(\eta_a(x_i, t_j))$$

Relation de détermination régie par une **règle de transition inconditionnelle**.

$$\# \eta_b(x_k, t_l) \xrightarrow{\alpha} f(\eta_a(x_i, t_j))$$

Relation de détermination régie par une **règle de transition inconditionnelle stochastique**. Si $\eta_b(x_k, t_l)$ est autrement indéterminé, on sous-entend que $\eta_b(x_k, t_l) = \eta_b(x_k, t_{l-1})$ avec une probabilité $1-\alpha$.

Index

A

agent..... 48, 49, 50, 51, 59, 61
 algorithme génétique..... 80
 aménagement 8, 33, 83, 94
 ARISTOTE..... 14, 23, 87
 atomisme 14, 15, 84
 automate 37
 auto-organisation 22, 26, 27, 29, 30, 31, 33, 93
 autophénomène 26, 27, 30, 61
 autopoïèse..... 22, 26, 29, 30, 31, 33
 autoreproduction 31

B

BAVAUD, François..... 76, 77
 BENENSON, Isaac 48
 BERQUE, Augustin..... 66, 91

C

cartographie..... 53, 55, 61, 73, 89, 91
 causalisme 14, 15
 chaos 6, 19, 20, 21
 CHURCH, Alonzo 16
 complexité..... 16
 dynamique..... 19, 20, 21
 seuil de ~..... 32
 statique (structurelle) 17, 20
 comprendre-expliquer 86
 constructeur-copieur universel 31
 constructivisme 6, 16
 contrainte structurelle..... 70
 CONWAY, John
 jeu de la vie de ~.. 13, 32, 49, 61, 77, 78

D

DÉMOCRITE 14
 DENNETT, Daniel..... 90
 déterminisme 84
 développement durable 55
 diffusion
 agrégation limitée par ~ 24, 25
 de l'information..... 16
 DOWLING, Deborah 90
 dynamique. 7, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 27, 29, 31, 32, 36, 39, 40, 42, 49, 53, 54, 55, 57, 58, 68, 69, 73, 77, 83, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 95

E

échelle 20, 22, 23, 28, 33, 51, 52, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 84, 85, 86, 93
 effet papillon 19
 émergence 7, 11, 13, 14, 22, 23, 24, 26, 27, 50, 67, 71, 83, 85, 87, 90, 94, 95
 EMPÉDOCLE..... 15
 ENGELEN, Guy..... 59, 74, 75, 82
 entropie 27, 31
 équifinalité 82
 équilibre dynamique..... 28
 équilibre instable *Voir* équilibre dynamique
 espace..... 91
 cellulaire. 13, 40, 45, 49, 53, 61, 66, 72, 86, 91, 93
 des variables..... 58
 euclidien..... 6, 53, 56, 67, 71, 102
 géographique..... 47, 61
 humain 6
 physique.. 55, 58, 59, 60, 69, 70, 72, 73, 74, 75
 signifiant 47, 73, 92, 93
 espace-temps 15, 48
 essence 87
 état..... 37, 38
 de l'automate cellulaire 39, 85
 du lieu 12, 36, 38, 40, 41, 50, 51, 52, 63, 64, 66, 67, 69, 74, 78, 80, 81
 d'un système.. 19, 28, 51, 52, 63, 64, 67, 74
 état..... 7
 EULER, Leonhard..... 15

F

FATÈS, Nazim..... 31
 flux 59, 70, 75, 76, 93
 universel..... 14
 fonction de transition 20, 36, 37, 40, 43, 78, 79, 80, 81, 82
 FOUCAULT, Michel 22
 FREDKIN, Edward..... 48
 compteur de parité de..... 32

H

HÄGERSTRAND, Torsten 13, 54
 HARVEY, David 87, 88, 90
 HÉRACLITE, d'Éphèse 15
 herméneutique 8, 69, 88
 holisme 15, 84, 86

HUMBOLDT, Alexander von 91
 HUSSERL, Edmund 26
 hypostasie 66

I

identité 14, 28, 30, 48, 84
 imprédictibilité 19
 incompatibilité 43
 individualisme voir atomisme
 inter-détermination **84**
 itération 40, 42, 49, 50, 78, 80, 85

J

jeu de la vie voir CONWAY

K

kinématon 13, 31
 KOLMOGOROV, Andreï N. 17

L

LANGLOIS, André 71
 LANGTON, Christopher 32, 50, 77
 fourmi de 49, 50
 loop de 32
 paramètre de 20
 LEIBNIZ, Gottfried W. 15, 44
 LEUCIPPE 14
 liberté 83, 84
 lieu **37**, 66
 linguistique 8
 LORENZ, Edward Norton 19
 LUHMANN, Niklas 30
 LYAPUNOV, Alexander M.
 exposant de 19

M

MALEVITCH, Kasimir 6
 MATURANA, Humberto 26, 29, 30
 métaphore **91**
 MINKOWSKI, Hermann 54
 modèle . 7, 8, 11, **12**, 13, 14, 15, 16, 19, 20,
 24, 25, 26, 36, 39, 40, 44, 48, 49, 50,
 51, 52, 53, 57, 58, 59, 62, 64, 65, 66,
 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76,
 82, 84, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94
 modèles basés individus (MBI) 88

N

NEUMANN, John von .. 7, 13, 31, 32, 36, 46,
 60, 88
 NEWTON, Isaac 15
 NIETZSCHE, Friedrich 15, 22, 84

noèse 67

O

objectivation 8, 55, 66, 69

P

percolation 23, 57, 85
 phénoménologie 8, 9, 26
 PHIPPS, Michel 71
 PLATON 66
 POINCARÉ, Henri 15, 19, 20
 prédicat .. 37, **38**, 48, 49, 58, 63, 66, 71, 87,
 92
 logique des ~s 36, 37, 38
 valeur de ~ 37, 38, 39, 42, 58
 PRIGOGINE, Ilya 27, 29
 proposition 37
 PUMAIN, Denise 27

R

RACINE, Jean-Bernard 91, 93
 RATZEL, Friedrich 93
 réalité . 6, 12, 23, 29, 40, 43, 53, 63, 73, 82,
 87, 89, 92
 réification 66, 70
 réseau neuromimétique **78**

S

SCHELLING, Thomas C. 7, 24, 53, 77, 86
 sémiologie 73, 95
 SIGAUD, Olivier 90
 simulation 13, 16, 23, 24, 39, 44, 63, 64,
 67, 73, 77, 86, 87, 89, 90, 91, 93
 SPINOZA, Baruch 48, 84
 stigmergie 28
 structuralisme 13, 14, 15, 17, 18, 21, 57,
 71, 72, 86
 structure dissipative 27, 28, 29, 30
 substrat 50
 système
 complexe 19, 22, 48
 dissipatif 27, 28
 théorie des systèmes 30

T

TOFFOLI, Tomasso 48
 topomorphose **66**
 TORRENS, Paul M. 48
 transfiguration 14
 transition
 fonction de ~ **40**
 règle de ~ **40**

TURING, Alan M. 13, 24
 machine de ~ 52

U

ULAM, Stanislaw 7, 12, 13

V

VARELA, Francesco 26, 29
 ville 6, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 31, 52, 61,
 70, 71, 73, 86, 93, 95

voisinage 73, 81
 de Moore 46, 78
 de von Neumann 41, 46, 59
 fonction de 76
 rayon de 46

Volonté de Puissance 15, 84

W

WERLEN, Benno 93
 WHEELER, John A. 48
 WOLFRAM, Stefan 15, 54

A

αὐτός 26, 27, 94

Γ

γενή 66

K

κοσμός 66, 67

Π

πάντα ῥεῖ 14

ποίησις 30

πρᾶξις 30

T

τὸ ἐὼν ἔστι 14

τόπος 27, 66, 67, 68

X

χώρα 66